

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

FACULTAD DE ECONOMÍA Y EMPRESA

MÁSTER EN ADMINISTRACIÓN  
Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS (MADE)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# **EL EFECTO BULLWHIP EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO: UNA APROXIMACIÓN BASADA EN TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

**BORJA PONTE BLANCO**

**OVIEDO, ENERO 2013**

**TUTOR: RAÚL PINO DÍEZ**

**COTUTOR: DAVID DE LA FUENTE GARCÍA**



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	<b>3</b>
<b>1. ORIGEN, OBJETO Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO</b>	<b>7</b>
1.1. PRESENTACIÓN Y ORIGEN DEL TRABAJO.	7
1.2. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO.	9
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO.	10
<b>2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA: CADENA DE SUMINISTRO Y EFECTO BULLWHIP</b>	<b>12</b>
2.1. LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO.	12
2.2. GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	15
2.2.1. COMPONENTES DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	16
2.2.2. ESTRUCTURA DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	16
2.2.3. PROCESOS DE NEGOCIO DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	17
2.3. TENDENCIAS ACTUALES: AGILIDAD Y ESBELTEZ.	18
2.4. EL EFECTO BULLWHIP: DEFINICIÓN Y MEDICIÓN.	21
2.5. REPERCUSIONES DEL EFECTO BULLWHIP.	24
<b>3. CAUSAS DEL EFECTO BULLWHIP</b>	<b>28</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.	28
3.2. ERRORES EN LAS PREVISIONES DE LA DEMANDA.	29
3.2.1. MÉTODOS BASADOS EN SERIES TEMPORALES.	31
3.2.2. MÉTODOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL.	33
3.3. AGRUPACIÓN DE LOS PEDIDOS EN LOTES.	34
3.4. VARIACIONES DE LOS PRECIOS DE LOS PRODUCTOS.	37
3.4.1. EL EFECTO BULLWHIP INVERSO.	38
3.5. ESPECULACIÓN Y SOBREPROTECCIÓN.	39
3.5.1. EFECTO DEL TIEMPO DE SUMINISTRO.	40
3.6. FACTORES CONTEXTUALES QUE POTENCIAN EL EFECTO BULLWHIP.	41

<b>4. SOLUCIONES AL EFECTO BULLWHIP</b>	<b>43</b>
<b>4.1. INTRODUCCIÓN: ¿CÓMO CONTRARRESTAR EL EFECTO BULLWHIP?</b>	<b>43</b>
4.1.1. EVITAR MÚLTIPLES PREVISIONES DE LA DEMANDA.	43
4.1.2. DIVIDIR LAS ÓRDENES DE PEDIDO.	44
4.1.3. ESTABILIZAR PRECIOS.	44
4.1.4. ELIMINAR LA ESPECULACIÓN.	44
<b>4.2. SOLUCIONES TRADICIONALES.</b>	<b>45</b>
4.2.1. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN.	46
4.2.2. POSTPONEMENT Y PERSONALIZACIÓN MASIVA.	47
4.2.3. EFFICIENT CONSUMER RESPONSE.	49
4.2.4. VENDOR MANAGED IVENTORY.	50
4.2.5. COLLABORATIVE PLANNING, FORECASTING AND REPLENISHMENT.	52
<b>4.3. SOLUCIONES BASADAS EN LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL.</b>	<b>53</b>
4.3.1. SISTEMAS MULTIAGENTE EN LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	55
4.3.2. SIMULACIONES NO INTELIGENTES DE LA CADENA DE SUMINISTRO.	59
<b>5. APROXIMACIÓN EMPÍRICA: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO</b>	<b>61</b>
<b>5.1. INTRODUCCIÓN: SISTEMA GLOBAL MULTIAGENTE.</b>	<b>61</b>
<b>5.2. SUBSISTEMAS MULTIAGENTE.</b>	<b>64</b>
5.2.1. AGENTE DE INFORMACIÓN.	65
5.2.2. AGENTE DE COMUNICACIÓN.	66
5.2.3. AGENTES DE PREVISIÓN.	66
5.2.4. AGENTE DE PLANIFICACIÓN.	68
5.2.5. AGENTE DE EVALUACIÓN.	69
5.2.6. AGENTE DE NEGOCIACIÓN.	72
<b>5.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA Y POSIBLES VARIACIONES DEL MODELO.</b>	<b>73</b>
5.3.1. CADENA DE SUMINISTRO LINEAL CON CUATRO NIVELES.	73
5.3.2. PEDIDOS NO RETIRADOS POR LOS CLIENTES Y ALMACENES ILIMITADOS.	73
5.3.3. STOCK DE SEGURIDAD NULO.	74
5.3.4. TIEMPO DE SUMINISTRO UNIDAD.	75
<b>5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.</b>	<b>75</b>
5.4.1. PSEUDOCÓDIGO.	77
5.4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO.	81
<b>6. APLICACIÓN NUMÉRICA (I): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS PREVISIONES DE LAS DEMANDAS</b>	<b>86</b>
<b>6.1. PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO.</b>	<b>86</b>
<b>6.2. PRUEBAS CON DEMANDAS ALEATORIAS.</b>	<b>87</b>
<b>6.3. PRUEBAS CON DEMANDAS REALES.</b>	<b>91</b>
<b>6.4. APLICACIÓN DE MÉTODOS AVANZADOS DE PREVISIÓN.</b>	<b>96</b>
<b>6.5. CONCLUSIONES.</b>	<b>98</b>



<b><u>7. APLICACIÓN NUMÉRICA (II): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS COSTES DE ROTURA DE STOCK</u></b>	<b><u>101</u></b>
<b>7.1. PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO.</b>	<b>101</b>
<b>7.2. CONSIDERACIÓN EXCLUSIVA DE LA OPTIMIZACIÓN DE COSTES.</b>	<b>102</b>
<b>7.3. CONSIDERACIÓN SIMULTÁNEA DE AMBOS CRITERIOS.</b>	<b>106</b>
<b>7.4. CONCLUSIONES.</b>	<b>107</b>
<b><u>8. APLICACIÓN NUMÉRICA (III): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA COOPERACIÓN ENTRE AGENTES</u></b>	<b><u>109</u></b>
<b>8.1. PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO.</b>	<b>109</b>
<b>8.2. PRUEBAS REALIZADAS.</b>	<b>110</b>
<b>8.3. CONCLUSIONES.</b>	<b>112</b>
<b><u>9. ESTUDIO DEL EFECTO BULLWHIP A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO</u></b>	<b><u>113</u></b>
<b>9.1. PRESENTACIÓN.</b>	<b>113</b>
<b>9.2. PRUEBAS REALIZADAS: ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL STOCK DE SEGURIDAD.</b>	<b>115</b>
<b>9.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE HERRAMIENTAS.</b>	<b>118</b>
<b><u>10. CONCLUSIONES</u></b>	<b><u>119</u></b>
<b><u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b><u>124</u></b>



# 1. ORIGEN, OBJETO Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

## 1.1. Presentación y Origen del Trabajo.

Una cadena de suministro engloba todos los participantes y procesos involucrados en la satisfacción de la demanda del cliente en torno a determinados productos. La gestión de la cadena de suministro abarca, por lo tanto, actividades relacionadas con los aprovisionamientos, la producción y la distribución física del producto, enmarcadas todas ellas entre un nodo o nivel inicial –que llamaremos fabricante– y un nodo o nivel final –que llamaremos consumidor–. El número de niveles intermedios dependerá de cada cadena de suministro, estando influenciado tanto por las características de los productos como por las cualidades de fabricante y consumidor y el entorno en que se mueven.

De esta forma, se han de considerar dos flujos principales a lo largo de la cadena de suministro:

- El flujo de materiales, que incluye la distribución física del producto desde el fabricante hasta el consumidor, y que también se denomina flujo aguas abajo.
- El flujo de información, que hace referencia a la recopilación de información procedente del cliente por parte del resto de miembros de la cadena, y que también se denomina flujo aguas arriba.

Analizando la cadena de suministro, Forrester (1961) observó que pequeños cambios en la demanda del cliente se amplificaban a lo largo de la cadena de suministro, generando mayores variaciones en la demanda soportada por los distintos niveles a medida que éstos se alejaban del consumidor. Es el denominado Efecto Bullwhip –también conocido como Efecto Látigo y Efecto Forrester–, que se representa, de forma esquemática, en la *figura 1.1* para una cadena de suministro de cinco niveles. Éste, según el posterior estudio de Lee et al. (1997), obedece principalmente a cuatro causas fundamentales:

- Errores en las previsiones de la demanda de los productos.
- Agrupación de los pedidos en lotes.

- Variaciones de los precios de los productos a lo largo del tiempo.
- Racionamiento en las políticas empresariales por miedo a la rotura de stock.

Diversos han sido los cambios en el macroentorno de las empresas durante las dos últimas décadas que han dibujado un nuevo panorama empresarial. El desarrollo de las tecnologías de la información, el abaratamiento de los costes de transporte y la rotura de las barreras en los mercados, entre otras causas, han desembocado en la percepción de que la competencia ya no se limita al producto en sí, sino al concepto global de la cadena de suministro. Desde esta óptica se le reconoce a la función de producción un papel estratégico como fuente de ventajas competitivas, de forma que las prácticas relacionadas con la gestión de la cadena de suministro suponen actualmente una de las principales preocupaciones de las empresas.

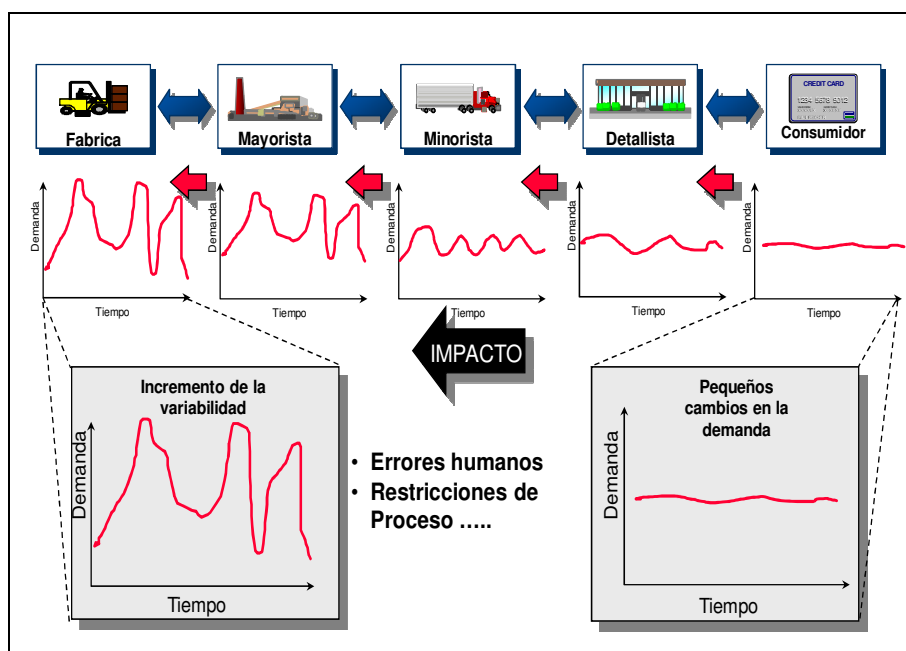


Figura 1.1. Evolución de la demanda a lo largo de la cadena de suministro y representación del Efecto Bullwhip (Fuente: Elaboración Propia).

Esta importancia estratégica se ve fuertemente potenciada en un momento como el actual, marcado por una crisis económica que ha debilitado la situación del tejido empresarial español. Incluso el estado de las empresas nacionales de distribución se encuentra en un punto delicado, debido al desfase existente respecto a las importantes cadenas multinacionales que se están instalando en nuestro país. A modo de ejemplo, la *tabla 1.1* contiene la evolución de la mercancía transportada por carretera en los diez países de la UE con mayor PIB de los que EUROSTAT posee datos. En ella se observa, como la situación de España, con un 35% de volumen de negocio perdido desde 2007

hasta 2010, es preocupante, siendo el decrecimiento muy superior al del resto de países europeos.

<i>País</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>Variación</i>
<b>Alemania</b>	3.028.466	3.078.347	2.769.201	2.734.605	<b>-9,70%</b>
<b>Dinamarca</b>	197.922	193.559	149.344	165.708	<b>-16,28%</b>
<b>España</b>	2.408.762	2.120.241	1.710.946	1.566.270	<b>-34,98%</b>
<b>Francia</b>	2.258.028	2.203.204	1.939.431	2.015.493	<b>-10,74%</b>
<b>Italia</b>	1.496.878	1.520.415	1.468.954	1.527.763	<b>2,06%</b>
<b>Noruega</b>	268.613	288.645	257.629	266.814	<b>-0,67%</b>
<b>Países Bajos</b>	636.170	621.287	616.903	513.167	<b>-19,33%</b>
<b>Polonia</b>	984.237	1.093.406	1.170.478	1.276.672	<b>29,71%</b>
<b>Reino Unido</b>	1.918.963	1.776.203	1.460.797	1.380.961	<b>-28,04%</b>
<b>Suecia</b>	360.151	366.831	333.837	322.107	<b>-10,56%</b>

*Tabla 1.1. Evolución de la mercancía transportada, en toneladas, por carretera en los países de la UE 2007-2010 (Fuente: Elaboración Propia, a partir de EUROSTAT, 2012).*

En estas circunstancias, se acentúa especialmente la importancia de la adecuada gestión de la cadena de suministro en torno a diferentes objetivos. Uno de ellos es, sin duda, la reducción del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la misma. De hecho, Disney y Towill (2003a) demostraron que el Efecto Bullwhip conduce a la cadena de suministro hacia costes innecesarios que pueden llegar a suponer más de un 30% de los costes totales de la misma. Estos costes innecesarios derivan, según el citado estudio, de la excesiva amplificación de la demanda que genera, entre otras consecuencias:

- Aumento de la capacidad de almacenamiento necesaria.
- Roturas de stock.
- Obsolescencia de los productos.
- Aumento del tiempo de suministro.

Es decir, se puede considerar el Efecto Bullwhip como un fenómeno causante de ineficiencias en la gestión de la cadena de suministro, generado a partir de los distintos agentes participantes en la misma.

## **1.2. Objeto y Alcance del Trabajo.**

Bajo el contexto expuesto, nace el Trabajo que se presenta, como una profunda aproximación al fenómeno del Efecto Bullwhip en las cadenas de suministro. Así, se pueden distinguir, a su vez, dos aproximaciones distintas dentro del Trabajo Fin de Master que desembocan, consecuentemente, en dos objetivos principales.

La primera es una aproximación teórica a la materia, basada en la revisión de la bibliografía, orientada a una completa comprensión de la gestión de la cadena de suministro y, más en concreto, del fenómeno del Efecto Bullwhip. Ello conlleva entender su significado y analizar las diferentes consecuencias que genera sobre la cadena de suministro, comprender las diferentes tipos de causas que lo provocan, y conocer las soluciones que se han afrontado a lo largo de las últimas décadas para afrontar este problema.

La segunda es una aproximación experimental al Efecto Bullwhip, basada en la aplicación de modernas técnicas de Inteligencia Artificial al problema. Se desarrolla, por un lado, un sistema multiagente que determine la política de pedido óptima, en base al mejor método de previsión de la demanda, para cada uno de los niveles de una cadena de suministro con un único elemento por nivel. Éste permite, además, analizar las principales causas del Efecto Bullwhip. Por otro lado, se acudirá a la simulación como herramienta de estudio para evaluar con mayor facilidad el efecto de algunos parámetros en cadenas de suministro más complejas.

Complementariamente, el presente documento actúa como Trabajo Fin de Master pretendiendo, desde el punto de vista académico, la conclusión del Máster en Administración y Dirección de Empresas por parte de Borja Ponte Blanco, alumno de la Universidad de Oviedo, cumpliendo con la normativa del Ministerio de Educación y Ciencia. De igual forma, esta primera aproximación al Efecto Bullwhip culminará, tras continuar la investigación alrededor de la materia, con la presentación de una tesis doctoral dentro del Programa de Doctorado en Administración de Empresas de la Universidad de Oviedo, en la línea de investigación “Inteligencia Artificial y sus aplicaciones a la Gestión de Empresas y a la Dirección de Operaciones”.

### **1.3. Estructura del Trabajo.**

El documento que se presenta se encuentra dividido en nueve apartados, pero podría dividirse, según el enfoque realizado, en dos grandes partes, además de los apartados 1, que recoge el origen, el objeto y alcance y la estructura del Trabajo, y 9, que agrupa las conclusiones del análisis y abre futuras líneas de investigación.

Los apartados 2, 3 y 4 coinciden con la aproximación teórica a la materia, y se basan en la recolección, estudio detallado y síntesis de la bibliografía más relevante y actual. El

apartado 2 incluye una amplia introducción a la materia objeto de estudio: el Efecto Bullwhip que se genera a lo largo de las cadenas de suministro. A continuación, el apartado 3 clasifica los principales factores que lo provocan, detallando la forma en que cada uno de ellos genera la amplificación de la demanda a lo largo de la cadena de suministro. El apartado 4, por su parte, aborda las formas clásicas de reducir el Efecto Bullwhip que se genera, así como nuevas soluciones basadas principalmente en los distintos campos de la Inteligencia Artificial.

En el otro enfoque, los apartados 5, 6, 7, 8 y 9 engloban la aproximación empírica al tema, y se basan en el desarrollo de un modelo, que se detalla en el apartado 5, y que se implementa a través de un sistema multiagente. A partir de ahí, el apartado 6 analiza el efecto de los errores de previsión de la demanda y de la aplicación de metodologías avanzadas de previsión. En la misma línea, el apartado 7 estudia el efecto de la consideración de los costes de rotura y almacenamiento en la disminución del Efecto Bullwhip a lo largo de la cadena. El apartado 8, analiza el efecto de la cooperación y negociación entre agentes, evaluando si es una alternativa eficiente en la reducción de la amplificación de la demanda generada. Por último, el apartado 9 introduce una nueva herramienta para el análisis de la cadena de suministro, utilizando una herramienta para la simulación de las cadenas de suministro, con el objetivo de analizar, de forma comparativa, las posibilidades de cada uno de ellos.

## **2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA: CADENA DE SUMINISTRO Y EFECTO BULLWHIP**

### **2.1. Logística y Cadena de Suministro.**

Durante muchos años, conceptos como “logística”, “administración logística”, “administración de materiales” y “distribución física” fueron utilizados como sinónimos y, en ausencia de un consenso general, sin una clara diferenciación sobre sus límites. Buscando el citado consenso, el Council of Logistics Management definió, en 1991, la logística como el proceso de planificación, implementación y control, para el eficaz y eficiente flujo y almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo final, de acuerdo a los requisitos del consumidor.

En la práctica, la principal novedad que este enfoque logístico introdujo en las empresas se basó en la concepción del proceso productivo de forma integral, considerando así un flujo que se inicia en los proveedores y que transcurre a través de la empresa –por sus centros productivos y de distribución– hasta los clientes. Así, el mencionado flujo comienza y acaba en los exteriores de la empresa, canalizando ésta sus esfuerzos hacia las actividades aprovisionamiento, producción y distribución específicas, e inherentes a la compañía.

Sin embargo, los cambios en el entorno genérico que se producen a partir de la década de los 70 y con especial intensidad en las dos últimas décadas<sup>1</sup>, han representado un nuevo contexto extremadamente competitivo, al que las empresas han tenido que adaptarse, con significativas variaciones en su estructura organizativa y en su forma de operar. La *tabla 2.1* recoge las modificaciones principales, desde un entorno estable y fácilmente controlable para las empresas hasta un entorno inestable e incontrolable para las empresas. Por ello, la estructura de las organizaciones ha evolucionado desde la rigidez hasta la flexibilidad.

---

<sup>1</sup> A grandes rasgos: auge de las tecnologías de la información y de la comunicación; disminución de los costes de transporte; y apertura de los mercados de bienes y servicios, de factores productivos y económico.



Derivado de los citados cambios contextuales, el proceso logístico clásico basado en el aprovisionamiento, producción y distribución se ha estado integrando a los procesos de otras unidades de negocio, formándose así una red de empresas. De esta forma, los diferentes participantes se han visualizado como eslabones de una cadena a la que se le denomina cadena de suministro. En estas circunstancias, la cadena de suministro representa una nueva forma de manejar las transacciones comerciales y las relaciones con otras unidades de negocio.

<i>Contexto tradicional</i>	<i>Contexto moderno</i>
Competencia local, que desemboca en una tendencia hacia la centralización.	Competencia internacional, que deriva en la necesidad de descentralización.
Mercado de vendedores, donde la demanda tiene a superar la oferta.	Mercado de compradores, donde la oferta tiene a superar la demanda.
Márgenes amplios de beneficios, por lo que la preocupación por los costes es moderada.	Márgenes estrechos de beneficios, lo cual convierte el control de costes es una n
Demanda creciente y fácilmente previsible.	Demanda estancada y dificultad de previsión.
El producto, generalmente con ciclo de vida largo, es lo más importante. No hay necesidad de un gran esfuerzo en el servicio.	El servicio adquiere gran importancia como elemento diferenciador junto al producto, generalmente con ciclos de vida cortos.

*Tabla 2.1. Cambios en el contexto empresarial en las últimas décadas (Fuente: Elaboración Propia).*

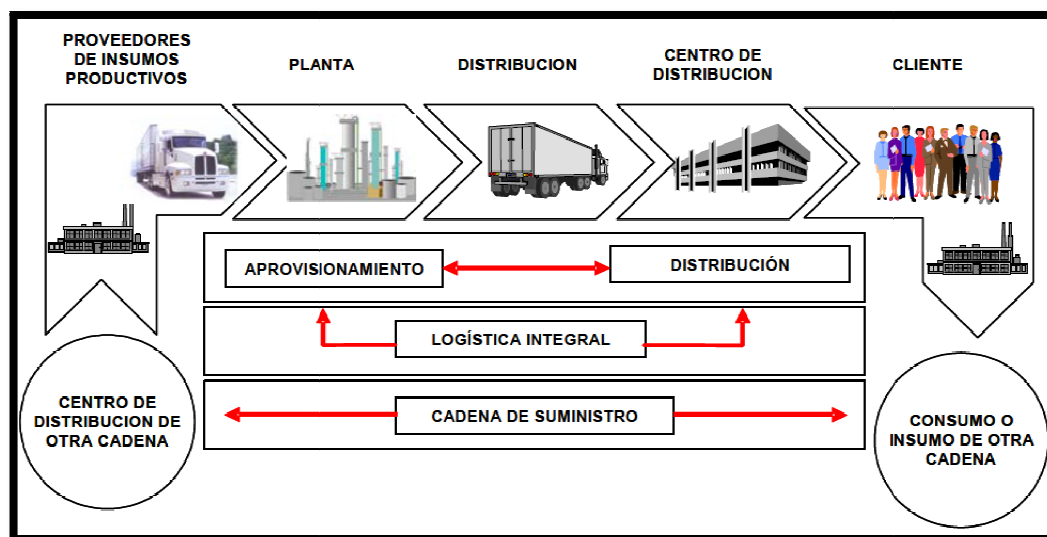
Desde ese punto, muchos investigadores han proporcionado su propia definición del concepto. Atendiendo a algunas de las autoridades más significativas, resaltamos tres:

- Para Christopher (1992), la cadena de suministro es una red de organizaciones que involucra, por medio de enlaces “aguas arriba” y “aguas abajo”, a los procesos y actividades que producen valor en la producción de bienes y servicios en las manos del último consumidor.
- De acuerdo a Simchi – Levi et al. (2000), la cadena de suministro es el conjunto de empresas eficientemente integradas por los proveedores, los fabricantes, los distribuidores y los vendedores y los mayoristas y/o detallistas, coordinados que busca ubicar varios productos en las cantidades correctas, en los lugares correctos y en el tiempo preciso, buscando el menor costo de las actividades de valor de los integrantes de la cadena y satisfacer los requisitos de los consumidores.
- En palabras de Ballou et al. (2000), la cadena de suministro involucra todas las actividades asociadas con la transformación y el flujo de bienes y servicios, incluyendo el flujo de información, desde las fuentes de materia prima hasta los consumidores. Para una coordinación continua, añaden los autores, existe la necesidad de poder medir, identificar y capturar los grandes beneficios y costos

de la cadena, creando mecanismos para distribuir información y ganancias de la colaboración a todos los miembros de la misma.

Con esta perspectiva, aunque algunos autores siguen utilizando de forma indistinta los conceptos de “logística” y “cadena de suministro”, se puede decir que la logística queda comprendida dentro de la cadena de suministro, formando parte de ella. Así, el Council of Logistics Management modificó, en 1998, su definición de logística, especificando que forma parte de la cadena de suministro: “es la parte del proceso de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla, para el eficaz y eficiente flujo y almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo final, de acuerdo a los requisitos del consumidor”. A modo de resumen, resaltamos la simple pero contundente afirmación de Bowersox et al. (1999), que señalan que la cadena de suministro es la logística, pero extendida más allá de las fronteras de la empresa.

Queda claro, entonces, que la cadena de suministro es algo más que la logística. Se trata de un término que plantea la integración de los procesos de negocio de varias organizaciones, con el objetivo de lograr un mayor impacto en la reducción de costes, velocidad de llegada al mercado, servicio al cliente y rentabilidad de cada uno de los participantes. La *figura 2.1* muestra esta idea.



*Figura 2.1. Configuración de la cadena de suministro (Fuente: Jiménez y Hernández, 2002).*

En estas circunstancias, teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados hasta aquí, podemos proponer la siguiente definición del concepto:

*“La cadena de suministro es el conjunto de organizaciones –proveedores, fabricantes, distribuidores, vendedores, mayoristas y/o minoristas– que participan de forma coordinada –yendo más allá de los intereses particulares de cada propia empresa y entendiendo la colaboración entre los distintos miembros como la forma de cumplir los objetivos al mínimo coste– en el proceso de satisfacción de las necesidades del cliente –está orientada a ubicar los productos necesarios en las cantidades correctas en los lugares adecuados y en el momento preciso–.”*

## **2.2. Gestión de la Cadena de Suministro.**

A grandes rasgos, el concepto de “gestión de la cadena de suministro” se puede definir como la gestión de las múltiples relaciones a lo largo de la cadena de suministro. Más en concreto, Jiménez y Hernández (2002) proponen que la gestión de la cadena de suministro obedece a cuatro objetivos específicos, relacionados entre sí en torno a un objetivo general de la maximización de la satisfacción del cliente. Estos cuatro objetivos se alcanzan, según los citados autores, a través de la eficiente integración de las organizaciones participantes en los niveles estratégico, táctico y operativo. Son:

1. Disminución de los costes de transporte y distribución, así como de los niveles de inventarios tanto en materias primas como en productos semielaborados y terminados, tratando de buscar la máxima eficacia en el uso de recursos.
2. Aumento de la calidad de los productos y servicios ofrecidos, a través del incremento en la eficiencia de las actividades de valor de los distintos participantes para conseguir ventaja competitiva a través de la misma, fomentando la colaboración y desarrollando sinergias.
3. Asegurar a la cadena de suministro la disponibilidad del producto dónde y cuándo sea necesario, al precio adecuado y con valor agregado para el cliente, como resultado de una mejor comprensión de sus necesidades.
4. Maximización de la retroalimentación y del conocimiento adquirido por los distintos niveles, disminuyendo así los costes transaccionales entre los distintos participantes en la cadena.

En la misma línea, Lambert et al. (2001) propone que el marco de la gestión de la cadena de suministro consiste en tres elementos sobre los que tomar decisiones y que mantienen una estrecha interrelación entre sí:

1. Componentes de la cadena de suministro.
2. Estructura de la cadena de suministro.
3. Procesos de negocio de la cadena de suministro.

### 2.2.1. Componentes de la Cadena de Suministro.

Los componentes de la cadena de suministro son todas las organizaciones que participan en la cadena de producción, de forma directa o indirecta, desde la obtención de materias primas hasta la venta al consumidor final.

Davenport (1993) diferencia los componentes primarios, que son los que llevan a cabo actividades de valor agregado, operativas o de gestión produciendo un rendimiento específico para un cliente en particular o mercado, y los componentes de apoyo, que simplemente proveen los recursos, conocimientos y utilidades para los miembros primarios. Es una diferenciación análoga a la propuesta por Porter (1987) para las actividades de la cadena de valor. Los proveedores de materias primas, fabricantes, mayoristas y minoristas son claros ejemplos de componentes primarios, mientras que los transportistas, bancos que prestan dinero o las compañías que venden los equipos productivos son ejemplos evidentes de componentes de apoyo, si bien en otros casos, la distinción no resulta muy obvia.

### 2.2.2. Estructura de la Cadena de Suministro.

La estructura de la cadena de suministro hace referencia a las relaciones, en cuanto al flujo de productos y de información, entre todos sus componentes.

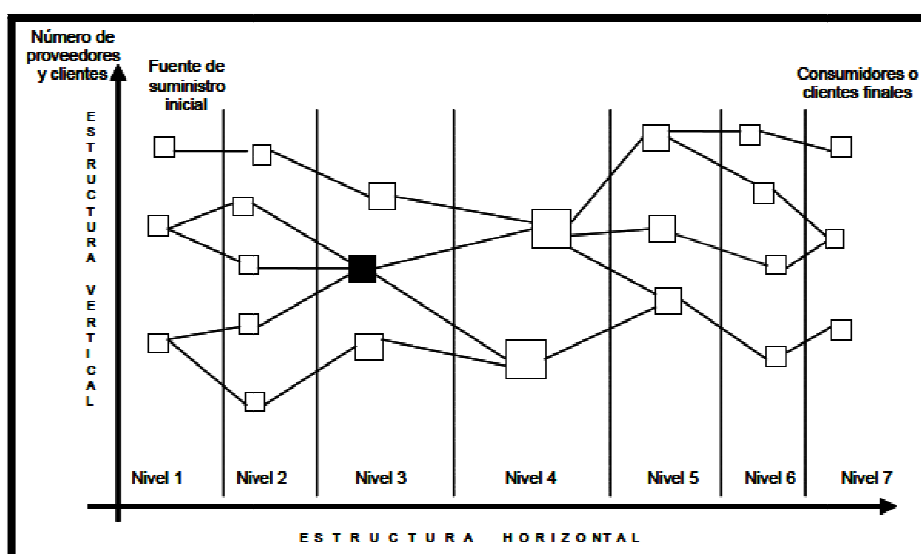


Figura 2.2. Dimensiones estructurales de la cadena de suministro (Fuente: Jiménez y Hernández, 2002).

Las dos dimensiones más relevantes son la longitud de la cadena o estructura horizontal, definida por el número de niveles distintos que la conforma, y la amplitud de la cadena o estructura vertical, definida a través del número de elementos que forma cada nivel. Algunos autores hablan de una tercera dimensión estructural, cuando en la cadena de suministro hay una empresa que sobresale con claridad sobre las demás, relacionada con la posición de dicha empresa. La *figura 2.2* representa gráficamente las dimensiones estructurales sobre una cadena de suministro.

Los principales factores que determinan las dimensiones estructurales de una cadena de suministro son la complejidad del producto; la disponibilidad de materias primas y el número de proveedores; y la cantidad y características particulares de los mercados a los que atender.

### **2.2.3. Procesos de Negocio de la Cadena de Suministro.**

Los procesos de negocio de la cadena de suministro son las actividades que producen un rendimiento específico de valor al cliente. Existen múltiples clasificaciones de los procesos de negocio de una cadena de suministro, entre las que destacamos la de Chopra y Meindl (2006). Los autores diferencian tres procesos macro, compuestos cada uno de ellos por cinco subprocesos:

- Administración de las Relaciones con Proveedores.
  - o Selección y evaluación de proveedores.
  - o Negociación de contratos.
  - o Aprovisionamientos.
  - o Colaboración en el diseño.
  - o Colaboración en el suministro.
- Administración de la Cadena de Suministro Interna.
  - o Planificación estratégica.
  - o Planificación de la demanda.
  - o Planificación de suministros y almacenamientos.
  - o Cumplimiento en el procesamiento de órdenes.
  - o Cumplimiento en el servicio.
- Administración de las Relaciones con Clientes.
  - o Marketing.
  - o Fijación de precios.

- Ventas.
- Atención al cliente.
- Administración de órdenes.

## **2.3. Tendencias Actuales: Agilidad y Esbeltez.**

El nuevo contexto empresarial es cada día más exigente para las empresas, provocando que éstas tiendan hacia el diseño de productos que consten varios módulos independientes que puedan ensamblarse de diferentes formas, con facilidad y bajo coste. A partir de ahí, y de forma correlacionada, los procesos de fabricación y servicio han de seleccionarse de manera que consten de etapas independientes, para que los productos puedan trasladarse y volverse a montar con facilidad. Y, en consecuencia, la cadena de suministro ha de diseñarse de forma que permita incluso la fabricación de productos, y debe poseer agilidad y capacidad de respuesta para recibir pedidos y entregar los bienes personalizados rápidamente, para adaptarse a los cambios y reaccionar ante eventos inesperados.

Surge, así, el concepto de “agilidad”. Y es que, aunque la importancia de la variable tiempo como arma competitiva en relación a la cadena de suministro ha sido reconocida desde hace ya muchos años (Stalk, 1988), la habilidad para satisfacer las demandas de los clientes empleando tiempos de entrega cada vez más cortos y para garantizar que la oferta se pueda sincronizar para satisfacer los picos y valles de la demanda se ha vuelto de crítica importancia en la última década.

Christopher (2000) fue uno de los pioneros en el estudio del concepto, marcando las distancias de la agilidad con la filosofía lean. El autor define la agilidad como la habilidad de una organización para responder rápidamente a los cambios en la demanda, tanto en términos de volumen como de variedad. Sus orígenes están en los sistemas de fabricación flexibles. Así, la agilidad es una capacidad de la empresa que abarca las estructuras de la organización, los sistemas de información, los procesos logísticos y, en particular, las formas de pensar. La filosofía lean –o esbelta, como la bibliografía traduce el término al español–, sin embargo, se basa en hacer más con menos. La fabricación lean busca trabajar con el mínimo inventario posible, en una aproximación basada en los sistemas Justo a Tiempo. Sus primeros pasos se asocian al sistema de

producción de Toyota, que estaba orientado a eliminar las fuentes de desperdicios en el proceso de gestión empresarial.

Aunque inicialmente se relacionaron los conceptos de fabricación lean y agilidad en la cadena de suministro, el citado autor observó que a menudo las empresas que optaban por la fabricación lean distaban en gran medida de una producción ágil<sup>2</sup>. Mientras la filosofía lean se centra más en la optimización del proceso productivo y, por lo tanto, en el interior de la empresa, la filosofía ágil se enfoca más hacia el cliente.

De esta forma, Christopher (2000), por un lado, propone la fabricación lean principalmente en entornos caracterizados por una demanda predecible, en los que la variabilidad requerida en las cualidades de los productos es baja y el volumen de producción sea alto. Por otro lado, recomienda el diseño de cadenas de suministro hacia la agilidad en entornos caracterizados por una demanda difícilmente predecible, en los que la variabilidad requerida en las cualidades de los productos sea alta y el volumen de producción sea bajo. La *figura 2.3* esquematiza la relación entre los dos principales enfoques modernos de las cadenas de suministro y las principales variables de diseño.

	BAJO VOLUMEN	ALTO VOLUMEN		DEMANDA PREDECIBLE	DEMANDA IMPREDECIBLE
ALTA VARIEDAD	ÁGIL		OFERTA A CORTO PLAZO	LEAN	
BAJA VARIEDAD		LEAN	OFERTA A LARGO PLAZO		ÁGIL

*Figura 2.3. Relación entre diferentes variables en cadenas de suministro lean y ágiles (Fuente: Elaboración Propia, a partir de Christopher, 2000).*

Desde el citado trabajo, el análisis de la agilidad y la esbeltez en las cadenas de suministro ha seguido evolucionando, en torno a los cambios que se van produciendo en el contexto empresarial. Gunasekaran et al. (2008) describen cómo las cadenas de suministro pueden dividirse en tres segmentos básicos: compras, fabricación y entregas, y sintetiza que la flexibilidad y rapidez de estos segmentos conducen a la definición de la agilidad en la cadena de suministro. A partir del análisis de casos reales, los autores basan el desempeño en la cadena de suministro a la sincronización de los siguientes factores críticos de éxito:

<sup>2</sup> Christopher (2000) cita como ejemplo aclaratorio la industria del automóvil. Desde los comienzos con Toyota, han sido varias las compañías que han desplazado su sistema productivo hacia la fabricación lean. Sin embargo, con tiempos de suministro al cliente final muy elevados y capacidad de respuesta muy lenta ante cambios de la demanda, insiste en que estos sistemas distan mucho del concepto de agilidad, marcándose así una clara barrera entre ambos conceptos.

- Estrategias para llegar directamente al consumidor final (B2B) y a otras empresas (B2C).
- Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) y para la Administración de las Relaciones con los Clientes (CRM).
- Sistemas Justo a Tiempo (JIT).
- Logística basada en Internet (WWW).
- Sistemas de Fabricación Bajo Pedido (PULL).
- Reingeniería de Procesos de Negocio (BPR).

Gattoma (2010) amplió el análisis de Christopher (2000), añadiendo nuevas variables al estudio. El estudio aconseja la fabricación lean en entornos en los que la demanda es predecible y la relación con el cliente es pequeña –desde el marco del eslabón inferior de la cadena de suministro– y en entornos en los que la confiabilidad en la oferta es alta y la relación con el proveedor es estrecha –desde el marco del eslabón superior–, orientándose así hacia la eficiencia. En condiciones inversas –demanda impredecible, baja confiabilidad en la oferta y relaciones estrechas con proveedores y clientes–, los autores señalan que la filosofía ágil es la óptima, tratando de incidir sobre la ecuación que relaciona coste y servicio.

El autor también se centra en los casos intermedios, añadiendo que en casos de alta predictibilidad en la demanda y confiabilidad en la oferta, en los que las relaciones con clientes y proveedores no sean muy estrechas, bastará con buscar un enfoque flexible<sup>3</sup> en la cadena de suministro, tratando simultáneamente de aumentar la eficiencia en la producción y evitar riesgos de suministro. En la situación opuesta –cuando las relaciones con cliente y proveedor son estrechas y la predictibilidad de la demanda y la confiabilidad de la oferta con altas–, el autor considera que la optimización de la cadena de suministro se logra con una orientación hacia el modelo del reabastecimiento continuo, que trata de integrar todos los elementos de la cadena hacia la minimización de tiempos, inventarios y costes.

La *figura 2.4* sintetiza el análisis de Gattoma (2010) detallado en los dos párrafos anteriores.

---

<sup>3</sup> En su estudio inicial, Christopher (2000) ya mencionaba que la flexibilidad, a pesar de ser el origen del concepto de agilidad en la cadena de suministro, es, a día de hoy, tan solo uno de sus componentes. La flexibilidad incide más en la capacidad de adaptación a los cambios, mientras que la agilidad incorpora la variable tiempo como un factor crítico.



	DEMANDA PREDECIBLE	DEMANDA IMPREDECIBLE		ALTA CONFIABILIDAD DE LA OFERTA	BAJA CONFIABILIDAD DE LA OFERTA
BAJA RELACIÓN CON EL CLIENTE	<b>LEAN</b>	<b>FLEXIBLE</b>	BAJA RELACIÓN CON EL PROVEEDOR	<b>LEAN</b>	<b>FLEXIBLE</b>
ALTA RELACIÓN CON EL CLIENTE	<b>REABASTECIMIENTO CONTINUO</b>	<b>ÁGIL</b>	ALTA RELACIÓN CON EL PROVEEDOR	<b>REABASTECIMIENTO CONTINUO</b>	<b>ÁGIL</b>

*Figura 2.4. Relación entre diferentes variables en cadenas de suministro lean y ágiles (Fuente: Elaboración Propia, a partir de Gattoma, 2010).*

## 2.4. El Efecto Bullwhip: Definición y Medición.

Complejidad y dinamismo son los dos principales variables que caracterizan el entorno de las empresas en la actualidad, generando considerables dificultades en el proceso de búsqueda de ventajas competitivas. Los agentes logísticos que conforman la cadena de suministro no son una excepción. La lejanía en los mercados y la alta competitividad son algunos factores que forman parte de la complejidad mencionada. El breve ciclo de vida de los productos y la progresiva disminución de las barreras son ejemplos de factores que fomentan el dinamismo aludido.

Esta situación desemboca en una alta incertidumbre que tiende a generar a lo largo de la cadena de suministro previsiones incorrectas de la demanda, planificaciones erróneas, inventarios desajustados, entregas a destiempo, transportes mal dimensionados y otras consecuencias que generan a las distintas empresas unos importantes sobrecostos. De todas las repercusiones, la primera es la fundamental, ya que la demanda es el motor de todas las actividades de los diferentes agentes logísticos que conforman la cadena de suministro.

A este respecto, existen múltiples evidencias empíricas de que, en las cadenas de suministro, surge un fenómeno causante de ineficiencias en la gestión como las descritas anteriormente. Es el conocido como Efecto Bullwhip o Efecto Látigo, y hace referencia a la transformación sufrida por la demanda del mercado a medida que se transmite entre los distintos niveles de la cadena de suministro. Ésta se representa, a modo de ejemplo, en la *figura 2.5*. Así, la información recibida por cada nivel es más incierta cuanto más lejos esté del cliente final, por lo que las ineficiencias resultantes irán en aumento. Ello generará, lógicamente, un mayor perjuicio sobre los agentes que se encuentran en las etapas iniciales de la cadena de suministro.

El Efecto Bullwhip también es conocido como Efecto Forrester, ya que fue Jay Wright Forrester (1961) el primer autor que realizó una descripción formal del fenómeno. El

autor sugiere en ese primer trabajo que la causa de las ineficiencias no es solo la incertidumbre de la demanda del propio mercado, sino que éstas se ven fuertemente potenciadas por el comportamiento de los diferentes agentes participantes de la cadena. Este hecho queda evidenciado en el famoso “Juego de la Cerveza”<sup>4</sup>, propuesto por Sterman (1989) en el MIT, y que desde entonces es practicado en múltiples Escuelas de Negocio y de Ingeniería.

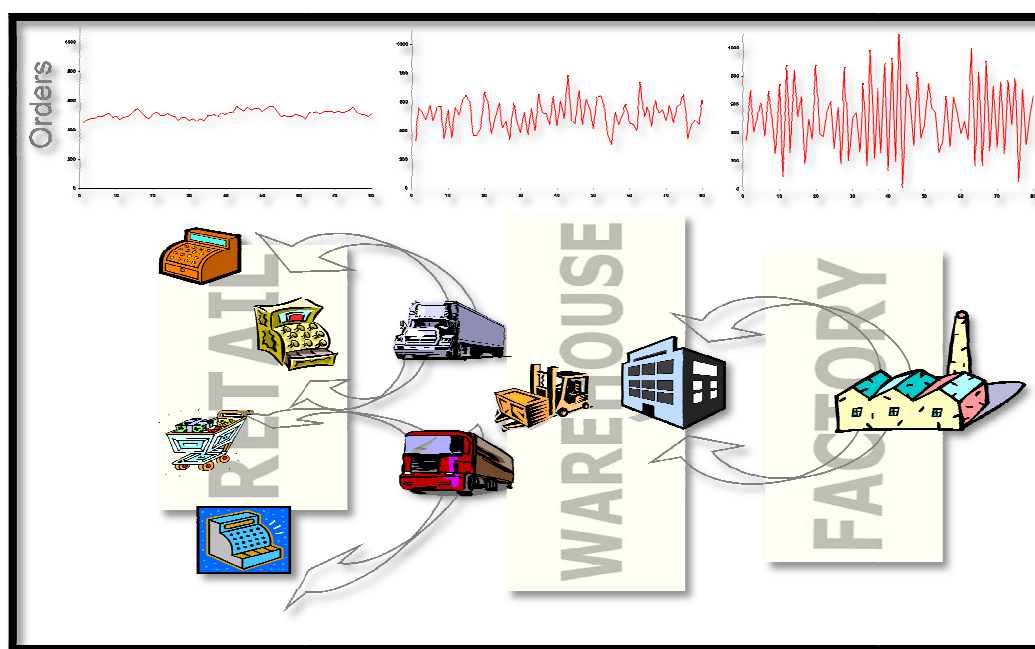


Figura 2.5. Representación del Efecto Bullwhip en una cadena de suministro de tres niveles (Fuente: Disney et al., 2005).

Desde este punto, se define el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro como la amplificación de la varianza de los pedidos transmitidos a lo largo de la misma. Ello permite cuantificar el Efecto Bullwhip (*EB*) con facilidad, según se muestra en la ecuación 1<sup>5</sup>, como el cociente de la varianza de la demanda realizada por

<sup>4</sup> En el “Juego de la Cerveza”, los participantes forman distintos grupos, cada uno de los cuales simula la toma de decisiones de una de las distintas empresas de la cadena de suministro de una conocida marca de cerveza. Los grupos no se comunican entre sí, y realizarán órdenes de pedido hacia el nivel superior de la cadena de suministro, basándose en los requerimientos recibidos desde el nivel inferior. Trata de reproducir, así, la realidad. El experimento lleva a demostrar que las ineficiencias en la cadena de suministro se generan en la interacción y en las bases del pensamiento más que en las estructuras internas y políticas de las organizaciones. Cada grupo de alumnos cree tomar la mejor decisión para la empresa, pero acaba observando como ella –unida a la del resto de grupos– acaba generando múltiples problemas para la cadena de suministro, que se podían haber mitigado con otra forma de actuar.

<sup>5</sup> Otros autores, como Zarandi et al. (2008), usan la expresión  $EB = \frac{\sigma_{dc}^2 - \sigma_{df}^2}{\sigma_{dc}^2}$ , variante de la ecuación 1, que ofrece el mismo resultado pero con un desfase de una unidad, con el objetivo de expresar el Efecto Bullwhip como una variación, en forma de proporción o tanto por ciento.

el consumidor –recibida por el nivel inferior– ( $\sigma_{dc}^2$ ) y la varianza en el ritmo productivo del nivel superior, que llamaremos fábrica ( $\sigma_{df}^2$ ).

$$EB = \frac{\sigma_{df}^2}{\sigma_{dc}^2} \quad [Ec. 1]$$

De la misma forma, es posible definir el Efecto Bullwhip que se genera en cada nivel de la cadena de suministro ( $EB_i$ , donde  $n$  hace referencia al nivel a considerar) como el cociente entre la varianza en los pedidos enviados al nivel superior de la cadena de suministro o demanda transmitida ( $\sigma_{dt}^{2n}$ ), y la varianza en los pedidos recibidos del eslabón inferior de la cadena de suministro o demanda recibida ( $\sigma_{dr}^{2n}$ ), según se expresa en la *ecuación 2*.

$$EB_n = \frac{\sigma_{dt}^{2n}}{\sigma_{dr}^{2n}} \quad [Ec. 2]$$

Teniendo en cuenta que la demanda recibida por nivel más bajo de la cadena coincide con la demanda del consumidor y que la demanda transmitida por el nivel más alto de la cadena coincide con el ritmo productivo de la fábrica, y según muestra la *ecuación 3*, es posible expresar el Efecto Bullwhip ( $EB$ ) a lo largo de toda la cadena de suministro como el producto del Efecto Bullwhip en los diferentes niveles ( $EB_n$ ), siendo  $N$  el número de niveles de la cadena de suministro.

$$EB = \prod_{n=1}^N EB_n \quad [Ec. 3]$$

Esta forma de definir el Efecto Bullwhip es ampliamente utilizada, incluso por los autores más fructíferos en la materia, como única forma de medición del fenómeno. Sin embargo, tal y como explican Martín-Andino y Sarabia (2006), puede ocurrir que el comportamiento de la demanda transmitida sea –bien en un eslabón o en el global de la cadena– muy distinto al de la demanda soportada, pero que, sin embargo, no se altere significativamente la variación del cociente. Esta situación podría tener una gran repercusión en los inventarios, aunque no alteraría la medición del Efecto Bullwhip anterior<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Para ilustrar este hecho, se puede recurrir al ejemplo de políticas de pedido que tiendan hacia un pedido medio periódico. Lógicamente, este hecho va a minimizar la variabilidad de la demanda transmitida, y así, por tanto, el Efecto Bullwhip medido según la *ecuación 2*. Sin embargo, esta situación tenderá a derivar en roturas de stock y el sobredimensionamiento de los almacenes, lo cual justifica una forma alternativa de medir el Efecto Bullwhip.

En este contexto, son varios los autores, como Disney y Towill (2003b), que proponen una medida complementaria del Efecto Bullwhip, orientada a considerar su efecto sobre los inventarios del producto a considerar en la cadena de suministro. Así, se expresaría el Efecto Bullwhip en cada escalón ( $EB_n^s$ , donde  $n$  hace referencia al nivel a considerar) como el cociente entre la varianza en el inventario mantenido en el nivel a considerar de la cadena de suministro ( $\sigma_{stock}^2$ ) y la varianza en los pedidos recibidos del nivel inferior de la cadena de suministro ( $\sigma_{dr}^2$ ), según se recoge en la *ecuación 4*.

$$EB_n^s = \frac{\sigma_{stock}^2}{\sigma_{dr}^2} \quad [Ec. 4]$$

Cabe mencionar, que esta ecuación, sin embargo, no es extrapolable para hablar de un Efecto Bullwhip global generado en la cadena, ya que comparar la variación del inventario mantenido en fábrica con la variación de la demanda del consumidor ignoraría los inventarios del resto de niveles de la cadena de suministro, algo que no ocurre con los pedidos y demandas de cada nivel, ya que son éstos los que se trasladan a lo largo de la misma.

Como síntesis, citamos la definición de Martín-Andino y Sarabia (2006), que va un poco más allá de la original que proviene de la *ecuación 1*. Los autores hablan del Efecto Bullwhip como la distorsión<sup>7</sup> de la demanda transmitida entre los distintos agentes que conforman la cadena de suministro, siendo esta distorsión creciente a medida que nos alejamos del mercado, generándose un aumento en la variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena.

## 2.5. Repercusiones del Efecto Bullwhip.

De acuerdo a Lee et al. (1997), el término “Efecto Bullwhip” fue utilizado por primera vez por Procter & Gamble, cuando la compañía experimentó excesivas amplificaciones de la demanda para sus pañales “Pampers”, en una cadena de suministro que formaba junto a Wal-Mart y 3M. Los mismos autores citan el caso de los distribuidores de impresoras Hewlett-Packard (HP), que sufrieron un gran incremento de los pedidos recibidos, muy por encima de la demanda del mercado. Otros muchos autores han

---

<sup>7</sup> La RAE define distorsión como la deformación de imágenes, sonidos, señales, etc. producida en su transmisión o reproducción. Ésta encaja a la perfección con el concepto a estudiar, aportando un interesante matiz, más allá del simple aumento en la variabilidad de la demanda transmitida a lo largo de la cadena de suministro.

encontrados evidencias de la existencia de este fenómeno, durante esa misma década, en la que las investigaciones en torno a la materia empezaron a crecer exponencialmente. Algunos ejemplos, en sectores muy distintos, son Bishop et al. (1994), que cita el aumento de la distorsión en el mercado de las turbinas para la producción de energía eléctrica; Mason-Jone y Towill (1999), quienes observan una gran amplificación de la variabilidad de la demanda de la cadena de suministro del automóvil; y Carlsson y Fuller (2001), que lo estudió en la demanda de celulosa, relacionándolo con los cambios en las ventas de papel.

Algunos autores han tratado de cifrar las pérdidas económicas generadas por este fenómeno. Por ejemplo, Metters (1997) hace referencia a algunos estudios realizados en diversos sectores de EEUU, situando en 35 mil millones de dólares las pérdidas generadas en el año 1993 en la industria del automóvil, y en 25 mil millones de dólares las pérdidas generadas en la industria del vestido. Sin embargo, conocer la importancia y las consecuencias del Efecto Bullwhip en una cadena de suministro determinada no es sencillo, por diferentes motivos, relacionados principalmente con su medición. Es preciso, como sostienen Fransoo y Wouters (2000), depurar datos muy dispares, con procedencias múltiples y agrupados de formas distintas, e incluso a veces incompletos. Es decir, la obtención de las varianzas necesarias para estimar el Efecto Bullwhip es, a menudo, un proceso muy complejo, sometido tanto a la forma de operar por cada miembro de la cadena de suministro como a la forma de recoger y mantener la información.

En cualquier caso, todas las citadas investigaciones conducen de forma inequívoca a que la amplificación de la variabilidad de la demanda en la cadena de suministro deriva en costes innecesarios. Disney et al. (2005) traza cinco itinerarios a través de los cuales la amplificación de la variabilidad de las demandas derivada del Efecto Bullwhip genera pérdidas económicas en la cadena de suministro, en general, y en las distintas empresas que la forman, en particular. Incluso menciona que estas pérdidas pueden llegar a superar el 30% de los costes totales en los que incurren las empresas. Estos cinco caminos principales<sup>8</sup>, representados de forma esquemática en la *figura 2.6*, son:

---

<sup>8</sup> Lógicamente, ni todos los caminos generan pérdidas económicas de igual magnitud. De hecho, es habitual encontrar en la bibliografía que los autores aproximan las pérdidas generadas por el Efecto Bullwhip a los sobrecostes generados en el almacenamiento. Tampoco todos los caminos afectan sobre todas las cadenas de suministro. Es decir, a modo de ejemplo, es posible disminuir los costes de rotura,

1. Las excesivas variaciones en la demanda soportada alteran el flujo productivo de las organizaciones, generando una irregular necesidad de mano de obra y otros recursos productivos, que tienden a desembocar en horas extra o subcontrataciones, que con una demanda más uniforme no serían precisos.
2. La amplia variabilidad en los pedidos recibidos se reflejan sobre los inventarios a mantener, lo cual provoca un aumento de la capacidad necesaria y, por lo tanto, un sobredimensionamiento del almacén, que dispara los costes de almacenamiento, especialmente en los momentos en los que su uso sea mínimo.
3. Las grandes variaciones en el nivel de inventarios que genera el Efecto Bullwhip también aumenta significativamente el riesgo de no poder atender a los pedidos recibidos, es decir, de rotura de stock. Ello supone, o bien, sobredimensionar más el almacén con un stock de seguridad, o bien, asumir el riesgo derivado de los costes de rotura.

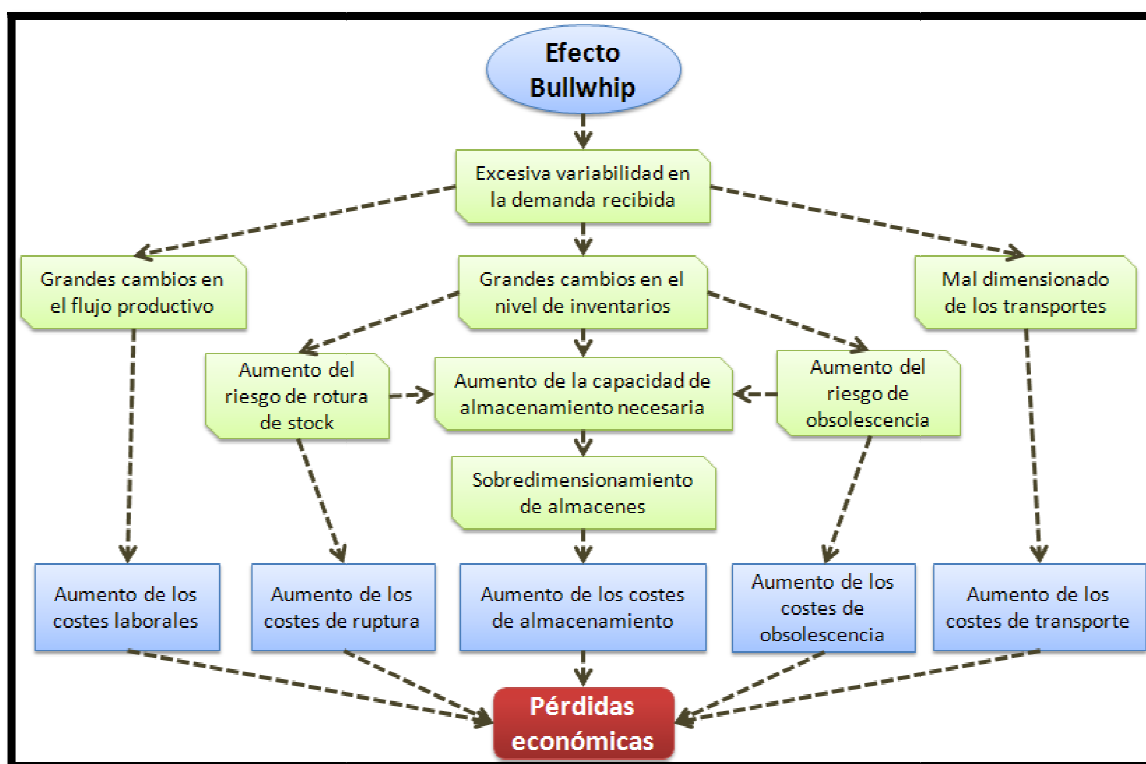


Figura 2.6. Repercusiones del Efecto Bullwhip en la cadena de suministro (Fuente: Elaboración Propia, a partir de Disney et al., 2005).

4. Al trabajar con inventarios mayores, para tratar de protegerse ante los problemas anteriores, aumenta significativamente el riesgo de obsolescencia de los

---

trabajando con un inventario mayor, pero esta decisión tendrá su repercusión sobre los costes de almacenamiento y de obsolescencia.

productos con los que trabaja la cadena de suministro, especialmente en una época como la actual donde los productos tienden a acortar su ciclo de vida.

5. El Efecto Bullwhip plantea grandes dificultades a los transportes entre los distintos miembros de la cadena de suministro, dificultando la planificación, lo que genera traslados deficientemente dimensionados y aumentos en los tiempos de suministro.

## 3. CAUSAS DEL EFECTO BULLWHIP

### 3.1. Introducción.

El Efecto Bullwhip es, de acuerdo a lo expuesto en el apartado anterior, una importante fuente de ineficiencias en la gestión de la cadena de suministro que arrastra a las organizaciones que lo sufren hacia unas considerables pérdidas económicas. El estudio de las soluciones que pueden llevar a la cadena de suministro a mitigarlo, o incluso eliminarlo, para tratar de esquivar sus consecuencias, exige un paso previo: entender las causas que lo producen.

Múltiples investigaciones se han llevado a cabo, y siguen realizándose en la actualidad, con el objetivo de determinar con exactitud las causas del Efecto Bullwhip. Todas ellas concuerdan en la existencia de dos fuentes principales de perturbaciones en la cadena de suministro. Por un lado, existen perturbaciones debidas al mercado –que denominaremos perturbaciones externas–, y, por otro, otras perturbaciones proceden de la forma de actuar de los agentes –que denominaremos perturbaciones internas–.

Martín-Andino y Sarabia (2006) justifican que las perturbaciones externas se deben, fundamentalmente, a cambios no previstos en la demanda del mercado que superan la capacidad de ser atendidos de forma autónoma por los agentes más cercanos a los clientes, de manera que estos cambios trasladan aguas arriba sus necesidades provocando unas expectativas crecientes en el resto de los agentes de la cadena. Por su parte, los mismos autores atribuyen las perturbaciones internas a dos tipos de causas: las malas prácticas logísticas o ineficiencias inherentes a la cadena –como pueden ser el retraso de pedidos, el mantenimiento de inventarios inapropiados o las deficiencias en las redes de comunicación y transporte–, y las actividades especulativas con ánimo de lucro o con miedo al futuro.

En una perspectiva similar, Lee et al. (1997) justifican que, si en la cadena de suministro se dieran ciertas condiciones estables de operación, todos los agentes podrían, directa o indirectamente, determinar la demanda del mercado, por lo que dispondrían de la información necesaria para conocer con precisión la demanda en el origen y ajustar sus políticas a tales hechos, y, así, no sucederían las alteraciones en la demanda transmitida.



Es decir, no existiría el Efecto Bullwhip. Las condiciones de estabilidad mencionadas en el citado artículo son:

- Demanda del mercado estacionaria.
- Ausencia de costes fijos en la emisión de pedidos, con un tiempo de suministro fijo.
- Precio de mercado del producto estacionario.
- Existencias inagotables en cada agente.

Lee et al. (1997) defienden que el Efecto Bullwhip surge a medida que las condiciones reales de operación distan de las de estabilidad, de forma que se magnifica según se aumenta la distancia a las mismas. En estas circunstancias, surgen las cuatro causas principales del Efecto Bullwhip propuestas por los autores, cada una de ellas relacionada con una de las condiciones de estabilidad. Ésta no es la única clasificación efectuada a tal efecto<sup>9</sup>, pero es la que utilizan la mayoría de los autores que estudian el Efecto Bullwhip en la actualidad. Tampoco se trata de una clasificación cerrada, sino que las cuatro diferentes causas guardan relaciones de dependencia entre sí. Éstas son:

- Errores en las previsiones de la demanda de los productos.
- Agrupación de los pedidos en lotes.
- Variaciones de los precios de los productos a lo largo del tiempo.
- Especulación y sobreprotección.

Cabe resaltar, en cualquier caso, que detrás de las cuatro causas está el traslado de información defectuosa a la cadena de suministro. A partir del esquema propuesto por los citados autores, realizaremos en este apartado una profunda aproximación a las causas del Efecto Bullwhip, completándola con los estudios más relevantes realizados en la bibliografía posterior al estudio de Lee et al. (1997).

### **3.2. Errores en las Previsiones de la Demanda.**

Todas las compañías que forman la cadena de suministro realizan previsiones de la demanda, de cara a planificar la producción y las necesidades de material, determinar la

---

<sup>9</sup> Las enormes diferencias entre los contextos empresariales que actúan sobre las empresas, unidas a las habituales discrepancias sobre la correcta definición del fenómeno durante sus primeras décadas de estudio, han favorecido la realización de múltiples clasificaciones sobre las causas del Efecto Bullwhip en esa época. Durante los últimos años, los autores más prolíficos en la materia se han basado en el modelo propuesto por Lee para continuar las investigaciones al respecto.

capacidad de almacenamiento necesaria y poder llevar a cabo el control de inventarios. Lo habitual es que cada compañía realice las previsiones de la demanda que soporta —es decir, del nivel inmediatamente inferior de la cadena de suministro— en base a datos históricos.

El hecho de que estos datos no procedan del mercado, sino de los pedidos realizados por uno de los niveles adyacentes de la cadena de suministro, los convierte en muy volátiles ya que, como demuestra el “Juego de la Cerveza”, los pedidos realizados por cada empresa de la cadena de suministro están fuertemente influenciados, no solo por las previsiones realizadas, sino también por las percepciones y la desconfianza. El momento en el que se fija la orden también contribuye a la distorsión de la información a lo largo de la cadena. De esta forma, basándose en estos datos de fiabilidad dudosa, cada empresa llevará a cabo las previsiones de la demanda.

Para ilustrar la forma en que la variabilidad es amplificada, resulta eficaz acudir a un ejemplo aclaratorio. Supongamos que somos un mayorista que se dedica a comprar directamente un producto a un fabricante y vendérselo a una tienda, directamente en contacto con el comprador final. Nosotros realizaremos las previsiones de la demanda, en base a los pedidos que nos lleguen de la tienda, que, como ya vimos, están condicionados por múltiples factores. Incluso también incluiremos estos factores en nuestro nivel de la cadena de suministro. Si, por ejemplo, nuestras sensaciones son que, por cualquier motivo, el producto puede aumentar sus ventas, tenderemos a realizar al fabricante pedidos más grandes de los que aconsejarían los datos históricos. A partir de ahí, todo este proceso estará ajustado con los datos provenientes de la demanda real. Es decir, si pensábamos vender 100 unidades, pero hemos vendido 80, haremos el próximo pedido más pequeño de lo necesario para tratar de compensar los errores de previsión. Así, nuestros pedidos sufrirán una mayor variación que la demanda del consumidor. De la misma forma, nuestros pedidos es la información que utilizará el fabricante para realizar sus previsiones, así que si realizamos cambios bruscos en los mismos, éstos van a tener una mayor repercusión sobre él, y tendrá que variar significativamente el ritmo productivo, repitiéndose el efecto generado sobre nuestro nivel. La *figura 3.1* ilustra lo explicado, con datos reales obtenidos en el centro de distribución de un tipo determinado de ensalada, dentro del proyecto SNEL<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Fransoo y Wouters (2000) llevaron a cabo el proyecto SNEL para el estudio del Efecto Bullwhip. Para ello, analizaron dos cadenas de suministro de productos básicos de alimentación, y sobre ellas evaluaron

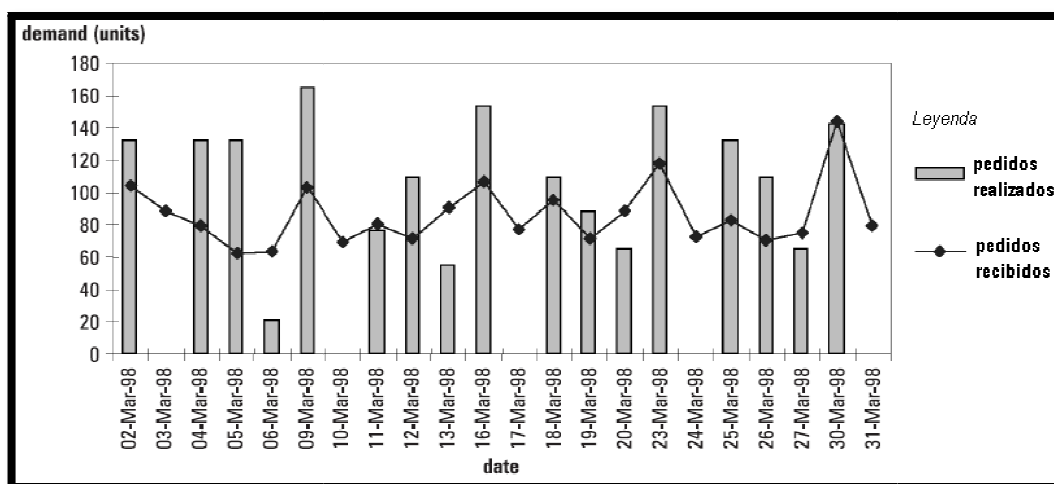


Figura 3.1. Ejemplo de la amplificación de la demanda (Fuente: Fransoo y Wouters, 2000).

Lee et al. (1997) afirman que los errores en las previsiones de la demanda son la principal causa en la generación del Efecto Bullwhip.

A partir de ahí, desde la comprensión de que la previsión de la demanda es una variable fundamental en la generación del Efecto Bullwhip, se puede insistir en la importancia de la búsqueda del método óptimo para cada caso. Se han realizado numerosos estudios sobre las diversas alternativas para la previsión de la demanda. Podemos clasificar los métodos en dos tipos:

- Métodos basados en series temporales.
- Métodos basados en Inteligencia Artificial.

### 3.2.1. Métodos Basados en Series Temporales.

Son técnicas matemáticas basadas en la utilización de datos históricos para la previsión de datos futuros. Principalmente, la bibliografía recoge la aplicación cuatro técnicas de previsión de series temporales para la estimación de la demanda.

1. Media móvil (MM), que obtiene cada valor como la media –ponderada o no, según el caso– de los últimos datos. Algunos estudios relevantes son los de Muth (1960), Graves (1999) y Reiner y Fichtinger (2009).
2. Alisado exponencial (AE), que, sobre la media móvil, además considera los errores de previsión llevados a cabo en las últimas estimaciones. Chen et al.

---

de forma práctica distintas alternativas para disminuir la amplificación de variabilidad generada a lo largo de la cadena.

- (2000) y Sun y Ren (2005) han utilizado esta técnica sobre la cadena de suministro.
3. Modelos autorregresivos (AR), que tratan de determinar la mejor combinación de los últimos datos para formular un modelo lineal que permita explicar el comportamiento de la demanda. Hosoda y Disney (2004), por ejemplo, analizaron la aplicación de estos modelos sobre el Efecto Bullwhip.
  4. Modelos autorregresivos de media móvil (ARIMA), que combinan las técnicas de media móvil y de los modelos autorregresivos. Gaalman y Disney (2006) y Chen y Disney (2007) han investigado al respecto.

Los primeros estudios realizados se basaron en medias móviles y alisados exponenciales, por motivos principalmente de flexibilidad y facilidad de uso. Todos los estudios han conducido inequívocamente a que estos métodos simples permiten obtener una gran reducción en términos de Efecto Bullwhip frente a la política de pedido 1-1, que se basa en la previsión de que la demanda en cada periodo será la misma que en el periodo anterior.

A partir de ahí, los modelos más avanzados, especialmente las técnicas ARIMA, permiten explicar el comportamiento de la demanda mucho mejor, disminuyendo considerablemente los errores en las previsiones. Este hecho tiende a llevar la cadena de suministro hacia una reducción aún mayor del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la misma. Sin embargo, Chaharsoogi et al. (2008) demostraron que el uso de métodos de previsión más avanzados no lleva en todos los casos hacia la reducción del Efecto Bullwhip<sup>11</sup>.

Es de resaltar que las anteriores no son las únicas técnicas utilizadas, sino que algunos autores trataron de aplicar herramientas avanzadas de previsión sobre este fenómeno. Destaca el trabajo de Sima et al. (2007), quienes introdujeron el filtro de Kalman<sup>12</sup> en el estudio del Efecto Bullwhip.

---

<sup>11</sup> Los autores utilizaron técnicas de simulación para analizar el comportamiento de la cadena de suministro en torno a diferentes métodos de previsión de la demanda y, sorprendentemente, llegaron a la conclusión de que la utilización de técnicas avanzadas no lleva de forma inequívoca a la reducción del Efecto Bullwhip, según la forma en que éste está definido (*ecuación 1*). Su estudio revela que, a pesar de generar unas previsiones más fiables, en determinadas condiciones, puede no mejorar los resultados en cuanto al Efecto Bullwhip generado. Aún así, el uso de técnicas más avanzadas también tendría otras repercusiones positivas sobre las empresas, que la llevan hacia la reducción de costes.

<sup>12</sup> El filtro de Kalman es un algoritmo de previsión y procesado de datos óptimo recursivo. Óptimo porque (busca minimizar el criterio del error cuadrático medio, incorporando toda la información que se

Por último, cabe mencionar también que son varios los estudios, como los de Skiadas (1986) y Islam y Meade (1997), que desaconsejan la aplicación de estos métodos basados en series temporales para productos de alta tecnología, demostrando que no ofrecen buenos resultados. En esos casos, Lynn et al. (1999) aconsejan el uso de técnicas cualitativas, como el método Delphi<sup>13</sup>.

### **3.2.2. Métodos Basados en Inteligencia Artificial.**

La Inteligencia Artificial es la rama de ingeniería orientada hacia la creación de sistemas de cómputo inteligentes, con capacidad de evaluación de las diferentes alternativas y de decisión ante problemas muy diversos. Aunque, dada su complejidad, el número de estudios utilizando técnicas de Inteligencia Artificial para la previsión de la demanda en la cadena de suministro es muy pequeño en comparación con los métodos basados en series temporales, algunos autores han abierto este camino.

Dentro de la Inteligencia Artificial, las Redes Neuronales Artificiales son una de las técnicas más utilizadas. Se trata de un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales, con una red de interconexión de neuronas en una red, que colabora para producir un estímulo de salida. Tienen una gran aplicación en la previsión de datos y Carbonneau et al. (2008) demostraron que permiten disminuir los errores de previsión frente a las técnicas basadas en series temporales más avanzadas.

Los mismos autores aplican Máquinas de Soporte Vectorial sobre las estimaciones en la cadena de suministro, llegando igualmente a la conclusión de que permite mejorar considerablemente la previsión de la demanda. Las Máquinas de Soporte Vectorial son un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado, que utilizan los datos históricos disponibles para diferenciar distintas clases, y así construir un modelo que prediga la clase de los nuevos datos a incluir.

Otro proceso que permite proporcionar inteligencia al modelo son los Algoritmos Genéticos, inspirados en la evolución biológica. Éstos parten de un gran conjunto de diferentes soluciones a un problema, cuya idoneidad se evalúa en torno a diferentes

---

le suministra para determinar el filtrado. Y recursivo porque no precisa mantener los datos previos. Se basa en una primera etapa de previsión y una posterior etapa de corrección.

<sup>13</sup> El método Delphi busca el consenso entre varios expertos, a través de un proceso iterativo, basado en un cuestionario que ha de ser respondido en varias ocasiones por los expertos, tratando de buscar el porqué de las discrepancias individuales de cada experto con la media del grupo.

criterios. Se escogen aquellas que proporcionan los mejores resultados, y se combinan el resto en busca de nuevas soluciones posibles, en un proceso que se repite de forma reiterada, hasta que se cumple cierta condición de parada. Liang y Huang (2006) utilizaron Algoritmos Genéticos, demostrando que permiten reducir el incremento de variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena de suministro y, consecuentemente, los costes derivados del Efecto Bullwhip.

### **3.3. Agrupación de los Pedidos en Lotes.**

Las demandas llegan a cada eslabón de la cadena de suministro, procedentes del inmediatamente inferior, en forma de pedidos. Éstos provocan una disminución del nivel de inventarios del citado eslabón, y a partir de ahí, la empresa asociada realizará unos pedidos hacia el eslabón inmediatamente superior. Sin embargo, lo habitual no es que cada miembro de la cadena de suministro realice sus pedidos inmediatamente después de recibirlos, sino que acumule o agrupe sus necesidades, para realizar las órdenes de pedido cada cierto tiempo, buscando economías de escala en la producción, envasado y transporte. La forma en que cada empresa lleva a cabo esta actividad es definida por la denominada política de pedido.

A grandes rasgos, se definen tradicionalmente dos políticas de pedidos:

- Política de Pedidos Periódicos.
- Política de Empuje de Pedidos.

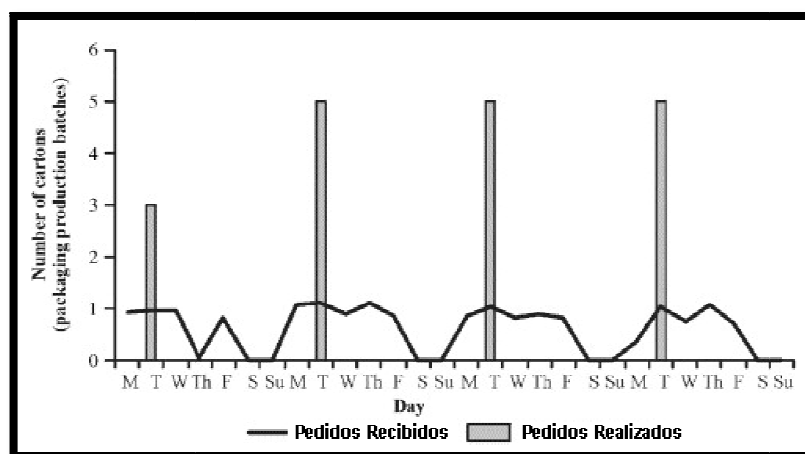
La Política de Pedidos Periódicos, por un lado, se basa en la realización de pedidos en intervalos fijos de tiempo, independientemente del nivel de inventario, con el objetivo de poder satisfacer la demanda hasta el próximo punto de pedido. De hecho, muchas empresas tienden a realizar pedidos semanalmente, quincenalmente o, incluso, mensualmente. Son varias las razones que justifican estas decisiones. En algunos casos, la realización de un pedido conlleva unos tiempos y costes fijos elevados<sup>14</sup>. En otros, la realización de pedidos muy pequeños genera a la empresa suministradora grandes problemas de distribución, que trasladará en cuanto a costes a la empresa que demanda el material. Otras organizaciones realizan profundas y periódicas planificaciones de necesidades de material (MRP), y llevan a cabo los pedidos tras ellas.

---

<sup>14</sup> En su estudio original, Lee et al. (1997) aportan que Procter & Gamble estimaban, en aquel año, los costes fijos de realización de pedido como una cantidad entre 35 dólares y 75 dólares, según el producto, relacionados únicamente con las intervenciones manuales necesarias, la facturación y los sistemas automáticos de envío.

La Política de Pedido Óptimo, por su parte, está basada en la realización de pedidos cuando el nivel de inventario alcanza un valor límite inferior, con el objetivo de que éste ascienda hasta un valor límite superior. La diferencia entre ambos límites suele atender a la cantidad óptima de pedido (EOQ), que es aquella que trata de minimizar los costes de realización del pedido, considerando simultáneamente los costes de realización del pedido, los costes de almacenamiento del material, los costes de adquisición del material<sup>15</sup> y los costes de rotura. De esta forma, ésta sería la principal razón que justifica esta decisión.

Para analizar la forma en que la agrupación de pedidos en lotes desemboca en el Efecto Bullwhip podemos considerar, a modo de ejemplo, una empresa de venta directa al cliente que realiza los pedidos periódicamente a un suministrador. Esta periodicidad puede ser fija –mensualmente, por ejemplo– para el caso de la Política de Pedidos Periódicos o variable –cuando se alcance el nivel inferior predeterminado– para el caso de la Política de Pedido Óptimo, ya que el ejemplo es válido para ambas políticas de pedido. En este ejemplo, el suministrador soporta una demanda extremadamente irregular: una vez cada cierto tiempo recibe un pedido determinado, mientras el resto de días hasta el próximo pedido no soporta ninguna demanda. Obviamente, esta variabilidad es mucho más elevada que la de la demanda de la empresa de venta, que contacta directamente con el cliente. La *figura 3.2* ilustra este hecho.



*Figura 3.2. Ejemplo de pedidos recibidos y realizados en el nivel más cercano de una cadena de suministro de zumos (Fuente: Potter y Disney, 2006).*

<sup>15</sup> En la práctica, es habitual que las empresas suministradoras ofrezcan descuentos en el coste unitario a partir de una determinada cantidad. Esto no obedece solamente a los beneficios directos que le genera a la empresa la venta de una mayor cantidad de productos, sino que el manejo de cantidades elevadas también le facilita la gestión, a través de la distribución de sus productos. Es el concepto del FTL (*full truck - loads*), según el cual, las empresas ofrecen descuentos en torno a cantidades que facilitan la máxima utilización de los medios de transporte.

Es fácil ver, entonces, que la agrupación de pedidos en lotes favorece la amplificación de la variabilidad de las demandas a lo largo de la cadena de suministro. Es decir, es otra de las causas del Efecto Bullwhip. En estas circunstancias, se puede observar, también de forma sencilla, que la amplificación será mayor cuanto mayor diferencia de periodicidad exista entre la frecuencia con que una empresa realiza los pedidos y la frecuencia con que la empresa los recibe.

A partir de ahí, múltiples autores han demostrado que la realización de pedidos pequeños, disminuyendo su periodicidad, favorece la disminución del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro. Higuchi y Troutt (2004) utilizaron técnicas de simulación para demostrarlo, llegando a la conclusión de que este hecho es especialmente significativo en los niveles superiores de la cadena de suministro. En la misma línea, Holland y Sodhi (2004) finalizan su estudio demostrando que el Efecto Bullwhip que se genera en un determinado nivel de la cadena de suministro es proporcional al cuadrado del tamaño del lote.

Continuando el estudio de Holland y Sodhi (2004), Potter y Disney (2006) también recomiendan reducir al máximo posible el tamaño del pedido, si bien –estudiando una amplia gama de tamaños de lote posibles– demuestran que el Efecto Látigo también se puede reducir si el tamaño del lote se acerca a un múltiplo del promedio de la demanda. De esta forma, se genera una onda creciente con unos mínimos en los citados puntos, alcanzando unos máximos en la mitad del camino. Esto ocurre tanto en caso de demandas estáticas como irregulares, representándose en ambos casos en la *figura 3.3*. Este estudio describe la forma en que los gerentes de la empresa pueden simultáneamente reducir el Efecto Bullwhip y trabajar con lotes grandes, con todas las ventajas ya comentadas que ello conllevaría.

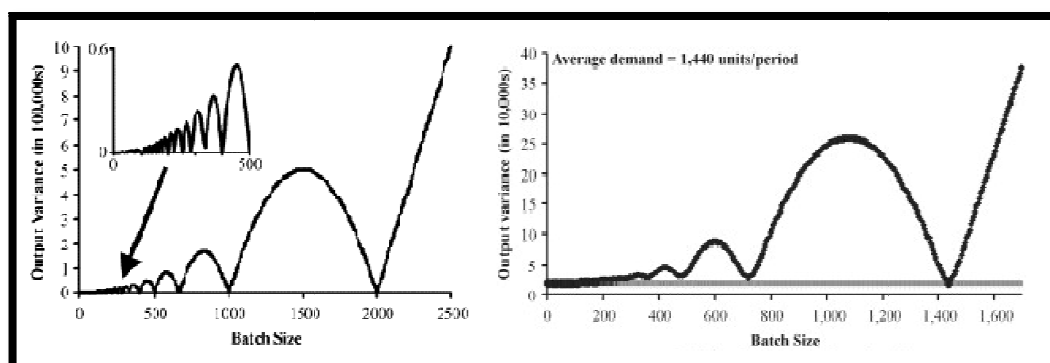


Figura 3.3. En el caso de demanda estática (izquierda) y aleatoria (derecha), varianza de la demanda transmitida en función del tamaño del pedido para unos datos determinados (Fuente: Potter y Disney, 2006).



### **3.4. Variaciones de los Precios de los Productos.**

Lee et al. (1997) señalan que, de forma general, más de la mitad de las transacciones realizadas entre diferentes niveles de la cadena de suministro se realizan en un marco de “compra adelantada”, en la que el comprador adquiere el producto –o, por lo menos, parte de él– en un momento previo al de su necesidad real a cambio de una oferta atractiva. Fabricantes y distribuidores tienen periódicamente promociones especiales (descuentos en el precio de compra, regalos de un número determinado de unidades, cupones para la adquisición de otros productos de la misma marca...) y realizan en ocasiones acuerdos comerciales (descuentos por pronto pago, negocio de las ventas a través de entidades bancarias...) que desembocan en variaciones en el precio de los productos.

Todo ello supone, como ya comentamos, que el comprador realice unos pedidos que no obedecen realmente a sus necesidades, de forma que se facilite enormemente el traslado de información distorsionada a lo largo de la cadena de suministro. De esta forma, estas promociones especiales y acuerdos comerciales pueden ser muy perjudiciales, en términos económicos, para el global de la cadena de suministro.

La forma en que este hecho repercute sobre el Efecto Bullwhip se extrae de forma sencilla. Los distintos componentes de la cadena de suministro tienden a realizar los pedidos en momentos en los que, a través de una u otra vía, el precio del producto es bajo. En esos instantes, realiza pedidos más altos de los que necesita, obligando a la empresa a trabajar con unos niveles más altos de inventario y aumentándose la necesidad puntualmente de recursos productivos. Cuando el precio del producto vuelve a valores normales, el cliente no comprará hasta que sea estrictamente necesario, ya que tendrá un margen proveniente de la situación anterior. De esta forma, los patrones de compra de cada nivel no refleja realmente sus necesidades, siendo la variación de sus órdenes de compra –es decir, de la demanda transmitida al nivel superior– mucho mayor que la de sus necesidades –es decir, de la demanda recibida del nivel inferior–.

En esas condiciones, lo habitual es que cada empresa analice el balance entre beneficios y perjuicios que la decisión de compra adelantada tiene sobre la propia organización de forma directa, sin considerar que esta forma de actuar puede tener unas graves consecuencias sobre la cadena de suministro que, de forma indirecta, también tendrán su repercusión sobre la empresa. Surge, así, una situación que Lee et al. (1997) califican de

“irónica”: es la propia cadena de suministro quién propone estos intercambios a costes reducidos que, sin embargo, también provoca importantes problemas en su gestión. Tratar de evitar la existencia de estas promociones en la cadena de suministro es una forma de disminuir el Efecto Bullwhip que se genera en la misma.

### 3.4.1. El Efecto Bullwhip Inverso.

Posteriormente al trabajo de Lee et al. (1997), algunos autores comenzaron a llamar a esta relación de influencia Efecto Bullwhip Inverso. Fue Svensson (2003) quién utilizó por primera vez este término. La razón, según el autor, es que en este caso el flujo de información –los precios– se produce desde los niveles más altos de la cadena de suministro hasta los niveles más bajos de la misma, al contrario que el Efecto Bullwhip, donde el flujo de información –que, en este caso, está relacionado con la demanda– se produce en el sentido contrario. El autor apunta que, además de obedecer a las promociones especiales y a acuerdos puntuales, este efecto se ve potenciado por otros hechos como las deficiencias en la calidad de los productos y en los sistemas de transporte y el ineficaz traslado de información a lo largo de la cadena de suministro. Es decir, apunta a que es algo que no solo se genera por las condiciones de venta que se imponen desde los niveles más superiores de la cadena.

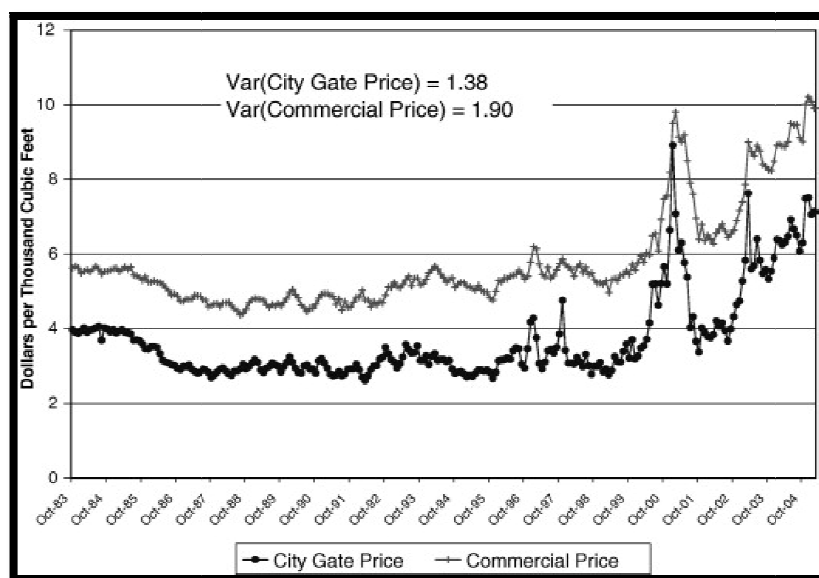


Figura 3.4. Comparación del precio de venta de la energía a las empresas de distribución y al cliente final en Estados Unidos desde 1983 hasta 2005 (Fuente: Özelkan y Çakanyildirim, 2009).

La figura 3.4, basada en datos de la Administración de la Información de la Energía (EIA) del Departamento de Energía de Estados Unidos, presenta una evidencia empírica

del Efecto Bullwhip Inverso, al mostrar que la varianza, durante 20 años, del precio de venta a las compañías de distribución (*City Gate Price*) es considerablemente inferior al precio de venta a los clientes finales (*Commercial Price*).

Özelkan y Çakanyildirim (2009) analizaron el efecto de diversas distribuciones de la demanda sobre el Efecto Bullwhip Inverso, llegando a la conclusión de que el aumento del Efecto Bullwhip Inverso tiende a aumentar el Efecto Bullwhip, pero que también se produce la relación en sentido opuesto. Asimismo, analizaron la relación entre ambos para distintas funciones de demanda, llegando a la conclusión de que ésta es máxima para las funciones que ellos llaman *low-log-convex*<sup>16</sup>. Hamister y Suresh (2008) también investigaron en la relación entre el Efecto Bullwhip y el Efecto Bullwhip Inverso, incidiendo en la importancia de la estabilidad de precios como método de reducción del Efecto Bullwhip.

### 3.5. Especulación y Sobreprotección.

Cuando la demanda de un determinado producto excede la oferta –es decir, en época de escasez– el vendedor tiende a racionalizar su entrega a los consumidores. De forma simplificada, podemos considerar que a cada uno le asignará la parte proporcional a lo requerido. Es decir, si solo se puede cubrir el 70% de la demanda con el stock disponible, a cada cliente se le entregará el 70% de lo que pide, con el objetivo de evitar dejar sin suministrar a algunos, lo cual supondría un gran riesgo de pérdida del cliente. De esta forma, el vendedor se organizará para entregar el 30% restante cuando disponga del producto para venderlo. Sin embargo, lo habitual es que, en ese momento, las órdenes de pedido se empiecen a anular. ¿Por qué? Porque si los compradores son conscientes de que el vendedor va a racionalizar la entrega de productos, tenderán a realizar pedidos más elevados, para recibir la cantidad que realmente necesitan en ese

---

<sup>16</sup> Cowan (2004) propuso medir la concavidad de una función como el coeficiente de curvatura relativa, que se puede expresar como el producto del valor de la función en un punto por el valor de su derivada segunda entre el cuadrado de el valor de su derivada en ese mismo punto. De esta forma, denomina funciones cóncavas (*log-conc*) a aquellas en las que el coeficiente es menor que 1 en todos los casos, y funciones convexas (*log-convex*) a aquellas en las que el coeficiente es mayor que 1 en todos los casos. Özelkan y Çakanyildirim (2009) demostraron que el Efecto Bullwhip Inverso se ve especialmente potenciado en funciones en las que el coeficiente vale entre 1 y 2, a las que denominaron funciones convexas leves (*low-log-convex*).

momento. Es lo que Lee et al. (1997) denominaron el “Juego del Racionamiento y de la Escasez”<sup>17</sup>, refiriéndose a ello como la cuarta causa del Efecto Bullwhip.

La bibliografía recoge, desde hace muchos años, múltiples evidencias de la existencia de este problema en las empresas. Por ejemplo, Kelly (1995) describe el caso de Motorola que, durante 1992 y 1993, no pudo satisfacer la demanda completa de teléfonos móviles, lo cual llevó a varios distribuidores a desperdiciar oportunidades de negocio. A partir de ahí, ciertas empresas distribuidoras, como AirTouch Communications, empezaron a actuar de forma defensiva ante la previsión de que la escasez se repitiese en el año siguiente, y realizaron pedidos de mayor cuantía de la requerida. Esta situación llevó a Motorola a presentar, en enero de 1995, unos datos donde mostraban un record en los ingresos de la compañía que elevó significativamente la cotización de las acciones de la compañía. Sin embargo, cuando los analistas de Wall Street fueron conscientes de que los pedidos habían sido inflados y que la situación se invertiría en los próximos periodos, las acciones sufrieron una rápida caída. Un proceso similar ocurrió en IBM (O'Connor, 1994) y en Hewlett-Packard (Lee et al., 1997).

El citado ejemplo nos permite ver la forma en que la tendencia hacia la especulación y la sobreprotección de los agentes desembocan en un excesivo aumento de la variabilidad de los pedidos realizados frente a los recibidos. Es decir, se traslada al resto de niveles de la cadena de suministro una información que no corresponde realmente con las necesidades de suministro. Así contribuye, de forma inequívoca, al aumento del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro. Nienhaus et al. (2006) demostraron que estas actuaciones de los distribuidores, basadas en el miedo a la rotura de stock, actúan como una barrera al intercambio de la información adecuada entre los distintos miembros de la cadena de suministro.

### **3.5.1. Efecto del Tiempo de Suministro.**

Directamente relacionado con la agrupación de los pedidos en lotes, está el concepto de “tiempo de suministro”. Este hace referencia al tiempo que tarda en llegar el material, desde que se hace el pedido, a la empresa que lo requiere. Ya Lee et al. (1997), en su famoso estudio, citaron un tiempo de suministro fijo como una de las condiciones

---

<sup>17</sup> Lee et al. (1997), en su clasificación de referencia, denominan *Rationing and Shortage Gaming* a la cuarta causa del Efecto Bullwhip. Ello se podría traducir literalmente por “Juego del Racionamiento y de la Escasez”. Sin embargo, creemos que referirse a ella como “Especulación y Sobreprotección” es una aproximación más adecuada en nuestro idioma.

básicas de estabilidad que ayudan a disminuir el Efecto Bullwhip a lo largo de la cadena de suministro. Aunque fueron Liao y Shyu (1993) los primeros que incorporaron esta variable en el estudio del Efecto Bullwhip, considerando que su variabilidad también contribuye a aumentar el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro.

Wang et al. (2008) demuestran que esto es así ya que la excesiva variabilidad del tiempo de suministro aumenta el riesgo de rotura de stock y, consecuentemente, el stock de seguridad con el que trabajan las empresas. De esta forma, motiva la realización de pedidos mayores –como forma preventiva ante la posibilidad de que el tiempo de suministro sea mayor que el esperado– que podrían ser disminuidos considerablemente en el futuro –especialmente si el tiempo de suministro fue menor que el esperado–, a modo de corrección ante el sobrestock generado.

### **3.6. Factores Contextuales que Potencian el Efecto Bullwhip.**

Aunque la clasificación básica más reconocida es la de Lee et al. (1997), otros autores han tratado de completarla, añadiendo otras causas a las anteriores. Sin embargo, el análisis de toda la bibliografía nos lleva a considerar que la clasificación de Lee et al. (1997) sintetiza a la perfección las principales causas<sup>18</sup> de la amplificación de la variabilidad de la demanda que se genera en las cadenas de suministro. Además de ellas, queremos recoger en un último apartado, otras que se recogen en la bibliografía, que preferimos denominar factores contextuales, ya que son inherentes a la cadena de suministro, que pueden potenciar la aparición del Efecto Bullwhip en las cadenas de suministro. Geary et al. (2006) señalan que hay escenarios en los que las órdenes de pedido se tienden a multiplicar.

Los factores contextuales más relevantes, y la forma en que éstos repercuten sobre el citado efecto, son:

---

<sup>18</sup> Bhattacharya y Bandyopadhyay (2010) analizaron con profundidad toda la documentación al respecto y realizaron una clasificación de las causas del Efecto Bullwhip, que recoge hasta 19 tipos de causas distintas. Sin embargo, a nuestro entender, algunas de ellas se podrían englobar dentro de la misma categoría, al guardar una fuerte relación entre ellas. Las políticas de inventario, reposición y pedido, por ejemplo, que los citados autores consideran tres causas diferentes, se podrían englobar dentro de la causa “Agrupación de los Pedidos en Lotes” propuesta por Lee et al. (1997). Es por eso que, tratando de sintetizar, hemos seguido la clasificación de Lee et al. (1997) para, a partir de ella, tratar de profundizar en las causas.

1. Estructura de la cadena de suministro. Cuanto más niveles tenga la cadena de suministro, mayor es la tendencia a aumentar el Efecto Bullwhip (Bhattacharya y Bandyopadhyay, 2010).
2. Mecanismos de comunicación en la cadena de suministro. El intercambio de información entre los distintos miembros favorece la reducción del Efecto Bullwhip (Agrawal et al., 2009), si bien una política de colaboración completa entre los distintos eslabones no siempre provoca el mejor resultado (Sohn y Lim, 2008).
3. Mecanismos de control de la cadena de suministro. La selección de un mecanismo de control inadecuado para un determinado nivel de la cadena de suministro puede llevar a la misma hacia el aumento del Efecto Bullwhip generado (Bhattacharya y Bandyopadhyay, 2010).
4. Procesos de las organizaciones. La forma en que una organización lleva a cabo sus actividades condiciona la maquinaria utilizada, y su fiabilidad, la cual puede añadir incertidumbre en la cadena de suministro, aumentando la variabilidad de la producción (Taylor, 1999).
5. Experiencia de la cadena de suministro y de sus participantes. Desde que se comenzó a estudiar el fenómeno, son muchos los autores que defienden que, si en una cadena de suministro, las causas que generan el Efecto Bullwhip se diesen en la misma medida a lo largo del tiempo, éste tendería a desaparecer a través de la experiencia acumulada por los distintos agentes. Yan y Kattock (2006) defienden el entrenamiento como una forma muy eficaz de mitigarlo.

## 4. SOLUCIONES AL EFECTO BULLWHIP

### 4.1. Introducción: ¿Cómo contrarrestar el Efecto Bullwhip?

La comprensión de las causas que generan el Efecto Bullwhip en las cadenas de suministro no es un proceso aislado, sino que desemboca inexorablemente en el análisis de las soluciones prácticas que pueden ayudar a las empresas a mitigarlo, con el objetivo de minimizar las repercusiones negativas que éste tiene.

Desde el primer estudio de Forrester (1961) al respecto, se insiste en la importancia de permitir el acceso de los distintos agentes que conforman la cadena de suministro a la información real –especialmente, a la demanda del cliente final respecto al producto– como forma de atenuar el Efecto Bullwhip. Es por ello que algunos autores, como Cachon (1999), van más allá de la definición original y expresan el Efecto Bullwhip como “un aumento creciente en la incertidumbre de la demanda transmitida por cada agente a su inmediato anterior”. Este hecho subyace de las cuatro causas principales que Lee et al. (1997) plantearon en su trabajo, convergiendo todas ellas en el traslado de información defectuosa a la cadena de suministro. En estas circunstancias, y partiendo del citado estudio, se puede derivar en la existencia de cuatro formas teóricas<sup>19</sup> de reducir el Efecto Bullwhip:

1. Evitar múltiples previsiones de la demanda.
2. Dividir las órdenes de pedido.
3. Estabilizar precios.
4. Eliminar la especulación.

#### 4.1.1. Evitar múltiples previsiones de la demanda.

Cuando varias empresas conforman una cadena de suministro, es habitual que cada una lleve a cabo algún tipo de técnica para la previsión de la demanda, basándose en los pedidos históricos que ha recibido del nivel inmediatamente inferior, los cuales están a su vez basados en las estimaciones de la demanda hechas por ese miembro, y en los

---

<sup>19</sup> Cada una de ellas estaría orientada a contrarrestar una de las causas del Efecto Bullwhip. Las denominamos “teóricas” porque son alternativas que las empresas no van a buscar directamente por sí solas, sino que lo harán dentro de algunos programas de gestión empresarial –“prácticas”–, como los descritos en el apartado 4.2.

errores en los que ha incurrido, corregidos en futuros pedidos. Como ya vimos, este hecho es la principal causa del Efecto Bullwhip. El remedio se podría basar en trasladar los datos de la demanda real del producto directamente desde el nivel inferior de la cadena hasta el resto de niveles. Así, todos ellos pueden hacer sus previsiones en base a los mismos datos de partida. A modo de ejemplo, Lee et al. (1997) señala que Procter & Gamble fue pionera en el desarrollo de técnicas junto a otros niveles de la cadena de suministro, como Wal-Mart y 3M, para la integración de las demandas, como la *Vendor Managed Inventory* (VMI, apartado 4.2.4).

#### **4.1.2. Dividir las órdenes de pedido.**

Partiendo de la base de que la agrupación de los pedidos en lotes es otra de las causas fundamentales del Efecto Bullwhip, la realización de pedidos más pequeños y, consecuentemente, más frecuentes es otra forma eficaz para la mitigación del mismo. Así, las empresas han de buscar estrategias de gestión que disminuyan los costes de pedido y lleven así hacia un menor periodo de reaprovisionamiento. Es el caso, por ejemplo, de General Electric, según información recogida por Smart (1996), consiguió reducir entre 1991 y 1995 el coste de emisión de pedido desde 50 hasta 5 dólares utilizando sistemas de Intercambio Electrónico de Datos (EDI, apartado 4.2.1).

#### **4.1.3. Estabilizar precios.**

En consecuencia al análisis de causas, la disminución de la frecuencia con la que se llevan a cabo variaciones en la venta de los productos a lo largo de la cadena de suministro, así como la reducción de la cuantía de las mismas, es otra vía que permite la mitigación del Efecto Bullwhip generado. Se trata de reducir los incentivos para la compra adelantada. Schiller (1994) explica cómo Procter & Gamble han utilizado prácticas como el *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* (CPFR, apartado 4.2.5), a través de las cuáles redujo la variabilidad en sus precios, a través de unas disminuciones menores en periodos de oferta, consiguiendo un aumento considerable en la cuota de mercado.

#### **4.1.4. Eliminar la especulación.**

La última de las causas del Efecto Bullwhip, según el análisis utilizado, deriva de las políticas de racionamiento en las empresas que no podían cubrir toda la demanda. Estas



políticas provocaban un aumento en la demanda de sus clientes que no correspondía a sus necesidades reales. Para eliminar esa motivación al sobrepedido, se trata de esquivar las políticas de racionamiento. Esto se puede lograr, por ejemplo, asignando el material en proporción a las ventas realizadas en el pasado. Esta es la técnica, según recoge Lee et al. (1997), que comenzó a implantar General Motors en los comienzos de la década de los 90.

## 4.2. Soluciones Tradicionales.

Como hemos visto en el apartado anterior, para contrarrestar el Efecto Bullwhip es necesario insistir en la veracidad de la información trasladada a lo largo de la cadena de suministro. Así, si todos los agentes conocen en todo momento la evolución de la demanda del mercado, éstos podrán actuar de forma consecuente a los cambios reales. La necesidad de disponer de esta información determina que la colaboración, de alguna u otra forma, entre los distintos miembros de la cadena de suministro sea la pieza clave en la mejora de la gestión. Aunque la colaboración no siempre se limita al traspaso de los datos de la demanda del mercado por parte del minorista<sup>20</sup>, ésta es, sin duda, la parte de mayor interés para las empresas, y es en la que se han centrado la mayoría de soluciones al Efecto Bullwhip descritas en la bibliografía.

La cesión de datos no es, lógicamente, gratuita y aquellos que los facilitan exigen contraprestaciones a los receptores, que suelen variar en función de las estrategias de cada agente. Todo ello ha dado lugar a una amplia gama de formas de colaboración según la relación entre los datos facilitados y la contraprestación exigida. Son las soluciones tradicionales<sup>21</sup> al Efecto Bullwhip, que se pueden agrupar en cinco clases, de acuerdo a Chen et al. (2000):

1. Tecnologías de la Información y la Comunicación.
2. *Postponement* y Personalización Masiva.
3. *Efficient Consumer Response*.

---

<sup>20</sup> Existen otras muchas áreas en el entorno de la cadena de suministro en las que los distintos miembros pueden colaborar entre sí. Martín-Andino y Sarabia (2006) citan, por ejemplo, la gestión de envases, los medios para el movimiento de cargas, la normalización de códigos, los etiquetados, las programaciones de entregas y la compartición de bases de datos.

<sup>21</sup> La bibliografía las denomina así porque, como vimos en el apartado 4.1, se llevan utilizando desde principios de la década de los 90. En contraposición estarían nuevas alternativas, como las analizadas en el apartado 4.3, que aplican modernas técnicas de Inteligencia Artificial a la gestión de la cadena de suministro.

4. *Vendor Managed Inventory.*
5. *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment.*

En cualquier caso, y pese a que está de sobra demostrada su eficacia en la reducción del Efecto Bullwhip, las colaboraciones tienen unas consecuencias que no siempre los agentes están dispuestos a afrontar. Existe una barrera de confianza difícilmente franqueable entre cliente y proveedores a la hora de establecer estos acuerdos. Mason-Jone et al. (1999) utilizan esta hipótesis para justificar por qué, en la práctica, no son tan frecuentes.

#### 4.2.1. Tecnologías de la Información y la Comunicación.

Por el concepto de “Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)” se engloban los elementos y las técnicas utilizadas en el tratamiento y la transmisión de la información, haciendo referencia principalmente a aquellas relacionadas con la informática, Internet y las telecomunicaciones. Su aplicación a la gestión de la cadena de suministro permite el traspaso de datos relevantes entre los distintos miembros que la forman y, así, reducir el Efecto Bullwhip generado en la misma.

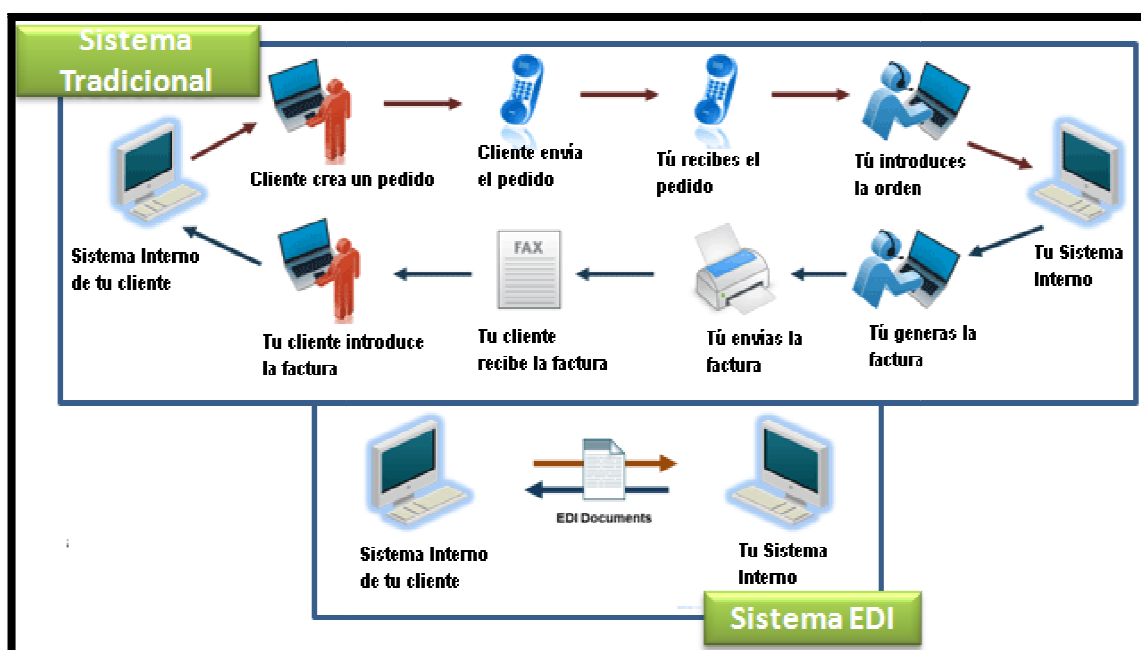


Figura 4.1. Comparación del sistema tradicional de intercambio de datos entre dos agentes de la cadena de suministro con uno basado en EDI (Fuente: Elaboración Propia, a partir de [www.edibasics.co.uk](http://www.edibasics.co.uk)).

Dentro de ellas, el Intercambio Electrónico de Datos (*Electronic Data Interchange*, EDI) ha sido utilizado con mucha frecuencia en las cadenas de suministro durante las últimas dos décadas. Esta técnica hace referencia a la transmisión estructurada de datos

entre organizaciones a través de medios electrónicos. Permiten enviar documentos desde una empresa emisora hasta otra empresa receptora, evitando muchos errores, propios de la comunicación tradicional en sus muchas variantes (fax, correo tradicional, teléfono...). La *figura 4.1* compara ambas formas de intercambio de datos.

Machuca y Barajas (2004) estudiaron a través de técnicas de simulación de cadenas de suministro el impacto del Intercambio Electrónico de Datos sobre la reducción del Efecto Bullwhip, llegando a la conclusión de que estas técnicas permiten mitigar en gran medida la ampliación de la variabilidad de la demanda generada a lo largo de la cadena y, consecuentemente, disminuir los costes de inventario. Los autores explican que esto se debe principalmente a que el Intercambio Electrónico de Datos permite:

- mejorar la fiabilidad de las predicciones de la demanda,
- disminuir los costes de realización de los pedidos y, consecuentemente, poder afrontar pedidos más pequeños,
- reducir el tiempo de suministro.

Una limitación del análisis de Machuca y Barajas (2004) es que no incluyen los costes de implantación y mantenimiento de estos sistemas. Walton y Lewis (1995) estimaron que, a mediados de la década de los 90, los costes inicial a afrontar por una empresa que implantase estos sistemas ascendían hasta los 250 000 dólares. Es por eso que, en aquella época, solo las grandes empresas podían utilizar estas técnicas. Procter & Gamble, General Electric y McKesson's Economost, por ejemplo, consiguieron simplificar enormemente el proceso de pedido utilizando estas técnicas, alcanzando todos ellos grandes reducciones en los costes de pedido y de almacenamiento (Lee et al., 1997). Sin embargo, hoy en día, los avances en las tecnologías de comunicación han disminuido enormemente los costes de implantación, hasta el punto de que ésta es una alternativa a valorar para cualquier empresa. Chau y Liu (2004), por ejemplo, demostraron la actual viabilidad de estas técnicas en pequeñas y medianas empresas, en torno a distintos objetivos, entre los que se encuentra la reducción del Efecto Bullwhip.

#### **4.2.2. Postponement y Personalización Masiva.**

La Personalización Masiva (*Mass Customization*) se refiere a un nuevo modelo productivo que implica a los clientes en el diseño del producto final, de forma que éstos puedan decidir sobre las características del mismo que mejor se adapten a sus necesidades, orientado a lograr grandes volúmenes productivos (Pine y Davis, 1999).

De esta forma, se busca generar una gran diferenciación del producto, que aumente significativamente su valor añadido y, consecuentemente, la competitividad empresarial.

Aunque el origen del término se le adjudica a Davis (1987) en su *best seller* “Futuro Perfecto”, no ha sido hasta la primera década del siglo XXI cuando la Personalización Masiva se ha empezado a aplicar en las empresas. Nike y Dell fueron algunas de las pioneras, y han ido desarrollando este concepto, desde unos primeros pasos donde el cliente podía decidir sobre ciertos aspectos limitados de sus productos hasta el momento actual donde la flexibilidad es máxima. Otras empresas, como Heineken, han incorporado esta posibilidad en los últimos años. La *figura 4.2* muestra algunas capturas de pantalla sobre cómo se puede llevar a cabo el proceso a través de las páginas web de las citadas organizaciones.

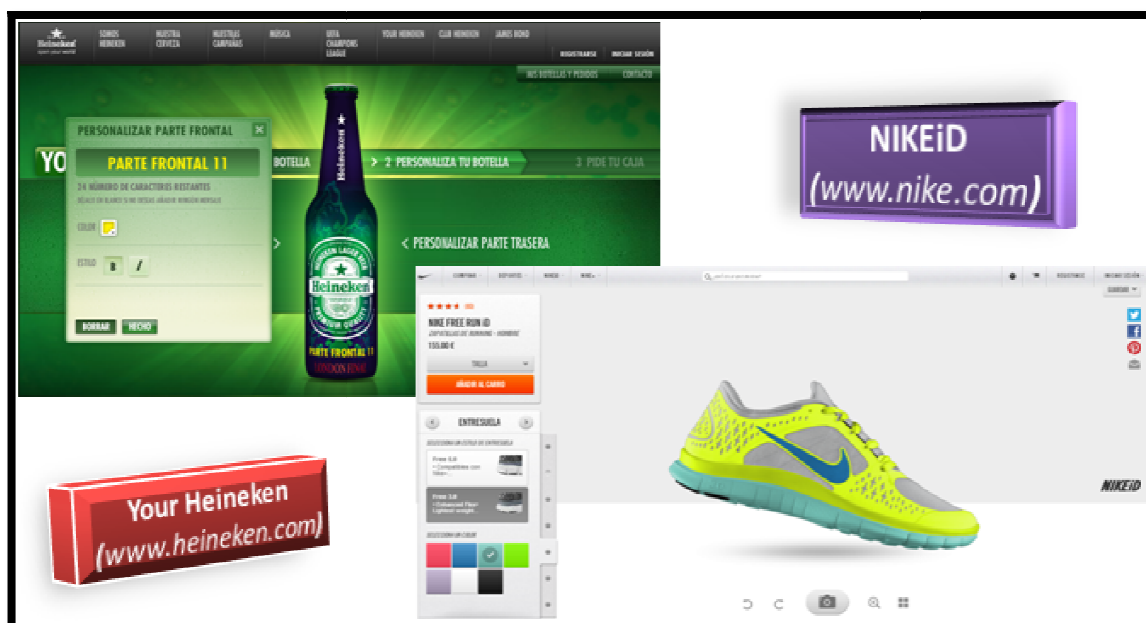


Figura 4.2. Capturas de pantalla del proceso de personalización masiva de las webs de Nike y Heineken  
(Fuente: [www.nike.com](http://www.nike.com) y [www.heineken.com](http://www.heineken.com)).

El reto para las empresas es llevar a cabo la Personalización Masiva, que otorga un incuestionable valor añadido al producto de cara al cliente, sin que ello se traduzca en un elevado aumento de los costes productivos. ¿Cómo conseguirlo? Hay diferentes caminos. El *Postponement* es el más utilizado en la actualidad. Esta estrategia empresarial se basa en un rediseño del producto y de la cadena logística, de forma que se estandaricen los procesos en lo general, permitiendo la diferenciación del producto en los puntos más cercanos al centro de consumo. Yang y Burns (2003) estudiaron las implicaciones del *Postponement* sobre la cadena de suministro, resaltando los

obstáculos a los que una empresa debía hacer frente al inclinarse por esta alternativa. En la misma línea, Chen y Lee (2009) demostraron que el *Postponement* permite, además de ser más flexibles a los requerimientos del mercado<sup>22</sup>, manejar un menor número de productos en inventario en niveles de superiores de la cadena de suministro, lo cuál a su vez lleva a disminuir el nivel global de inventario, así como facilita la previsión de la demanda del cliente. Es así como, de acuerdo a los citados autores, esta estrategia permite mitigar el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro.

#### **4.2.3. Efficient Consumer Response.**

El *Efficient Cosumer Response* (ECR) nace<sup>23</sup> en Estados Unidos en 1992, a partir de los acuerdos que firmaron algunas tiendas de venta directa al cliente del sector de la alimentación con sus cadenas de suministro, en las que habían detectado múltiples ineficiencias (McKinsey, 1992). El concepto fue, sin embargo, introducido por Robins (1994), quién señala que el objetivo principal del ECR es integrar los procesos logísticos y comerciales a lo largo de la cadena de suministro, de forma que, en lugar de maximizar la eficiencia de cada nivel de la misma por separado, se potencia la del sistema en su conjunto. Así, a través de la colaboración entre las distintas empresas que forman la cadena de suministro, se potencia el sistema *pull*, en el que se trata de responder siempre a la demanda real del consumidor, frente al tradicional sistema *push*, donde se fuerza el ingreso de los productos en los niveles de la cadena de suministro más cercanos al cliente.

Harris et al. (1999) resalta que el *Efficient Consumer Response* implica la búsqueda de una nueva relación basada en el trabajo conjunto y coordinada que aporte un mayor valor agregado a todos los eslabones de la cadena, aumentando la calidad y reduciendo los costes. El mismo autor defiende que para ponerlo en marcha, se debe estructurar

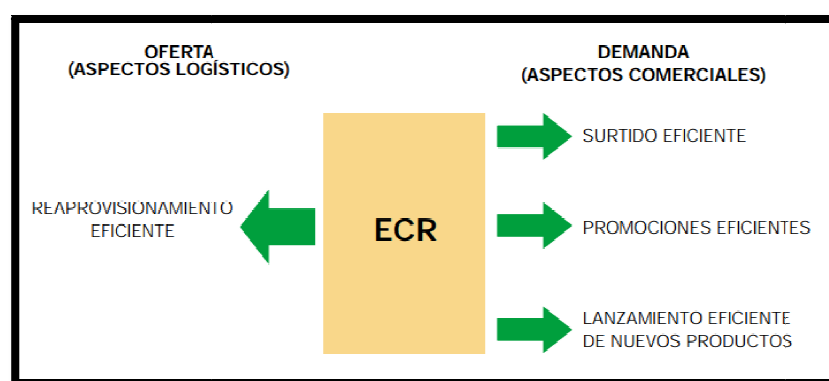
---

<sup>22</sup> Más allá de que también permite ayudar el Efecto Bullwhip, éste es el objetivo principal del *Postponement*. La idea se ilustra bien en el sector textil, donde pueden pasar varios meses desde que el producto se diseña hasta que se vende al cliente, es decir, desde el primer eslabón de la cadena de suministro hasta el último de la misma. De esta forma, existe el riesgo de que cuando un producto llega a las tiendas, no tenga éxito, por ejemplo, porque el color no sea el que mejor se ajusta a la moda en ese momento. Con el *Postponement* se trataría de rediseñar el proceso productivo, de forma que se diese color a la ropa en las últimas etapas de la cadena, muy próximos al consumidor final, tanto en espacio como en tiempo, donde ya se pueden conocer con más exactitud las tendencias más exitosas en el mercado.

<sup>23</sup> Los orígenes del *Efficient Consumer Response* están en el *Quick Response*, que se empieza a aplicar en Japón en la década de los 80, que se basaba en la colaboración de las distintas empresas, orientadas a sincronizar la cadena de suministro, con el objetivo de reducir la distancia temporal entre el primer y el último nivel de la misma. Así, sobre esta idea inicial, el *Efficient Consumer Response* incorpora nuevos principios.

simultáneamente desde dos perspectivas, que se esquematizan en la *figura 4.3*. Por un lado, el ECR de la demanda se orienta al logro de la eficiencia en el reaprovisionamiento, con el objetivo de aumentar las ventas y la satisfacción del cliente. Por otro, el ECR de la oferta está enfocado simultáneamente hacia tres objetivos:

- Surtido eficiente, basado en la optimización del espacio en los locales, para ofrecer al consumidor aquellos productos que realmente demanda;
- Promociones eficientes, buscando nuevos esquemas de promoción que aseguren un mayor impacto sobre el consumidor, sin generar costes adicionales en la cadena;
- Lanzamiento eficiente, buscando la información que permita disminuir los riesgos, y consecuentemente los costes, en el lanzamiento de nuevos productos.



*Figura 4.3. Estructura principal del Efficient Consumer Response (Fuente: Oubiña, 2002).*

De esta forma, una de las principales motivaciones para la aparición del *Efficient Consumer Response* era la reducción de los niveles de inventarios a lo largo de la cadena de suministro. Así, de acuerdo a Lee et al. (1997), esta estrategia empresarial se orienta a la colaboración entre las distintas empresas que constituyen la cadena, de forma que se evite el traslado de información distorsionada a lo largo de la misma y, consecuentemente, aumentar la fiabilidad de las predicciones de la demanda realizadas, disminuyendo el Efecto Bullwhip.

#### **4.2.4. Vendor Managed Inventory.**

La estrategia del *Vendor Managed Inventory* (VMI) se basa en optimizar la gestión de la cadena de suministro a través del manejo y la gestión por parte del proveedor –mayorista o fabricante– del nivel de inventario de su cliente –detallista–. Aunque la

idea es muy antigua<sup>24</sup>, ésta creció exponencialmente tras el éxito de Wal-Mart (Andel, 1996), que fue la primera gran compañía que lo llevó a la práctica. El auge de las tecnologías de la información y de la comunicación ha desembocado en una disminución de costes que la hace cada día más viable, si bien ya Holmstrom (1998) demostró que el *Vendor Managed Inventory* se podía llevar a la práctica de forma eficaz vía fax. La *figura 4.4* compara el sistema tradicional de comunicación entre dos miembros consecutivos de la cadena de suministro con el *Vendor Managed Inventory*.

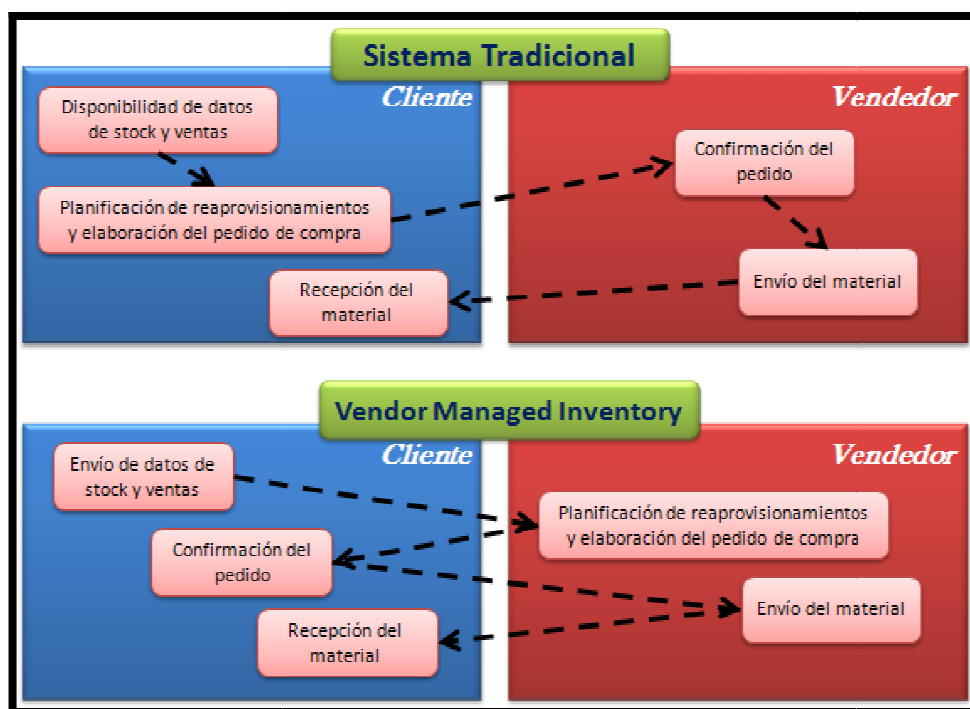


Figura 4.4. Comparación del Sistema Tradicional de comunicación entre cliente y vendedor en la cadena de suministro con el *Vendor Managed Inventory* (Fuente: Elaboración Propia).

Ya en su primer análisis, Lee et al. (1997) mencionaban que eran varias las grandes empresas<sup>25</sup> que utilizaban la técnica del *Vendor Managed Inventory* como forma de tratar de disminuir la amplificación de la variabilidad de la demanda, y consecuentemente de los niveles de inventario, en la que derivaban las principales del Efecto Bullwhip. Más tarde, Disney y Towill (2003b) profundizaron al respecto, estudiando de forma independiente las cuatro causas propuestas por Lee et al. (1997) como generadoras de este problema, demostrando que es posible anular completamente dos de ellas al llevar a cabo el *Vendor Managed Inventory* y que, a la vez, se consigue

<sup>24</sup> Magee (1958) mencionó las ventajas de esta práctica, mencionando un modelo conceptual óptimo para el diseño de un sistema del control de la producción.

<sup>25</sup> Los autores citan los casos de Procter & Gamble, Texas Instruments, HP, Motorola y Apple con algunos de sus proveedores e, incluso, con algunos de sus clientes.

disminuir el impacto de las otras dos. En este contexto, los autores llegaron a la conclusión que adoptar esta técnica puede llevar a la organización hacia una reducción muy importante en el Efecto Bullwhip que se genera en la cadena de suministro.

Por último, cabe mencionar que Disney y Towill (2003a), en el citado artículo, consideran que el *Efficient Consumer Response* y el *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* no son más que unos casos particulares dentro del *Vendor Managed Inventory*, ya que se basan en la misma idea de colaboración conjunta en la gestión de la cadena de suministro, de forma que cada inventario no sea gestionado únicamente por el nivel asociado, sino que se vea influenciado por las decisiones del resto.

#### 4.2.5. Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment.

El *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* (CPFR) es un concepto de gestión empresarial, que se orienta a la mejora de la integración en la cadena de suministro mediante el desarrollo de prácticas conjuntas. Se busca, en estas circunstancias, la gestión cooperativa del inventario en toda la cadena de suministro, a través de compartir información entre los distintos niveles de la misma. Este hecho posibilita, a la vez, la realización de previsiones de la demanda sincronizadas entre ellos.



Figura 4.5. Modelo Básico del Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (Fuente: Elaboración Propia, a partir de DesMarteu, 1998).



Desde que VICS propuso inicialmente el *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* en 1998 (DesMarteu, 1998), cuyo modelo básico se representa en la figura 4.5, han sido muchas las empresas que han implementado esta metodología. La bibliografía recoge los casos de algunas de ellas, llegando a la conclusión en todos los casos de los beneficios que supone en la gestión de la cadena de suministro. Por ejemplo, Williams (1999) describe cómo Procter & Gamble consiguió, a través de este concepto, crear valor para la organización y el resto de empresas que colaboraban con ella. Sagar (2003), por otro lado, estudió su incorporación en Whirlpool Corporation, llegando a la conclusión que supuso grandes mejoras en las previsiones realizadas a lo largo de la cadena de suministro. Es así como el *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* guía a la cadena de suministro hacia la reducción del Efecto Bullwhip. Bajo estas hipótesis, Ji y Yang (2005) desarrollaron una herramienta, basada en la colaboración entre los distintos niveles, para la reducción del Efecto Bullwhip en la cadena de suministro.

Este concepto se ha desarrollado con el tiempo, a medida que las novedades tecnológicas aumentan las posibilidades de las empresas, hasta el punto que algunos autores hablan actualmente de *Augmented Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* (ACPFR). Chang et al. (2007) se refieren a esta actualización, aumento las posibilidades de la idea inicial en cuanto a términos colaborativos, llegando a la conclusión de que el Efecto Bullwhip todavía se puede reducir en mayor medida.

### **4.3. Soluciones basadas en la Inteligencia Artificial.**

McCarthy (1955) fue quién acuñó inicialmente el término de Inteligencia Artificial, definiéndolo como “la ciencia de hacer máquinas inteligentes”. Se trata, entonces, de aportar inteligencia a los programas de cómputo, de forma que éstos actúen como un agente inteligente que permite pensar, evaluar distintas alternativas y actuar conforme a ciertos objetivos. Así, en una definición más moderna, Mira et al. (1995) definen la Inteligencia Artificial como “la disciplina que se encarga de construir procesos que, al ser ejecutados sobre una arquitectura física, producen acciones o resultados que maximizan una medida de rendimiento determinada, basada en la secuencia de entradas percibidas y en el conocimiento almacenado en tal arquitectura”.

La gestión de la cadena de suministro es un problema de elevada complejidad, condicionado por la interacción entre distintos agentes, cada uno de los cuales ha de atender a un elevado número de variables. A su vez, se tiende a desarrollar en entornos cada vez más inciertos, marcados por la dificultad de previsión de algunos parámetros que afectan de forma crucial a la gestión. Por estos motivos, se han buscado en los últimos años diversas formas de optimizar esta gestión de la cadena de suministro utilizando técnicas basadas en la Inteligencia Artificial, con múltiples estudios que han llegado a la conclusión de que ésta es una alternativa eficaz para afrontar el problema.

Una rama de la Inteligencia Artificial es la Inteligencia Artificial Distribuida, dedicada al estudio de las técnicas necesarias para la coordinación y distribución del conocimiento y las acciones en un entorno con múltiples agentes. Son los denominados Sistemas Multiagente. Así, el comportamiento de cada uno de los miembros principales del sistema es simulado mediante un agente<sup>26</sup>, interactuando entre ellos. De acuerdo con Maturana et al. (1999), cada agente persigue sus propios objetivos individuales, mientras que a su vez satisface las restricciones locales y externas impuestas.

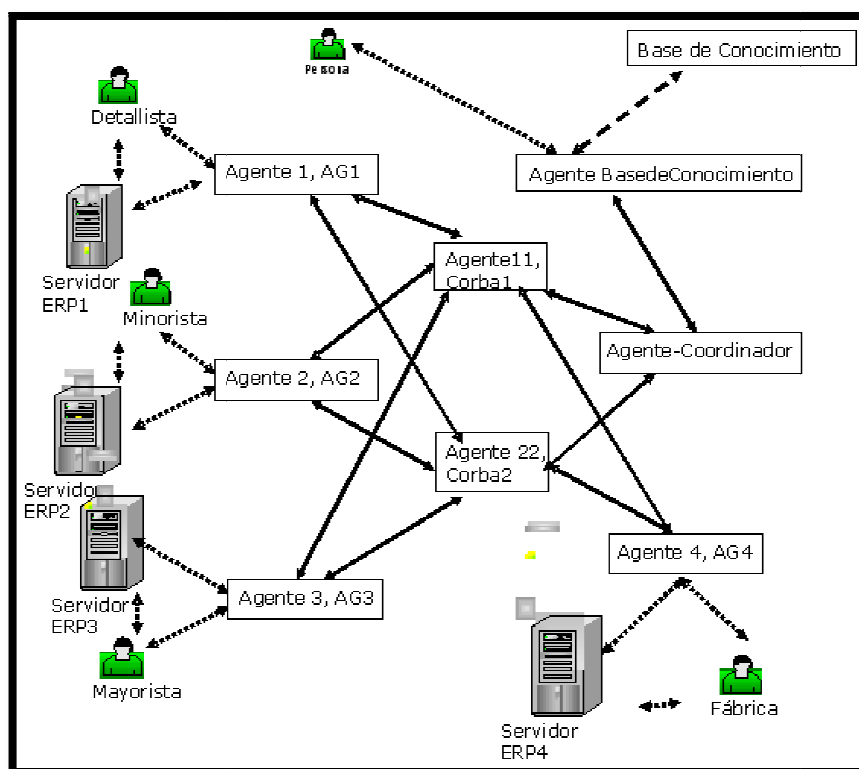


Figura 4.6. Ejemplo de sistema multiagente para el estudio de una cadena de suministro de cuatro niveles (Fuente: De la Fuente y Lozano, 2007).

<sup>26</sup> Podemos definir “agente”, a efectos prácticos, como un sistema informático, situado en un entorno cualquiera, que es capaz de realizar acciones autónomas y flexibles, que afectan a su ambiente de acuerdo a ciertos objetivos de diseño.

Son varias las características de la gestión de la cadena de suministro que aconsejan su análisis mediante un sistema multiagente, de acuerdo a De la Fuente y Lozano (2007):

- Se trata de un problema físicamente distribuido.
- Se trata de un problema con una amplia variedad de funciones.
- Se trata de un problema con una amplia complejidad global, facilitando su estudio la consideración de una suma de problemas de menor dimensión.
- Implica la necesidad de adaptarse a los cambios de la estructura y el entorno, tratando así los problemas de forma dinámica.

Por esos motivos han sido varios los autores que han planteado la cadena de suministro como una red de agentes inteligentes. A modo de ejemplo, la *figura 4.6* recoge de forma esquemática el modelo propuesto por los autores citados anteriormente. Este apartado muestra una revisión de la bibliografía más relevante actual relacionada con la gestión de la cadena de suministro a través de sistemas multiagente, principalmente en lo relacionado con la mitigación del Efecto Bullwhip.

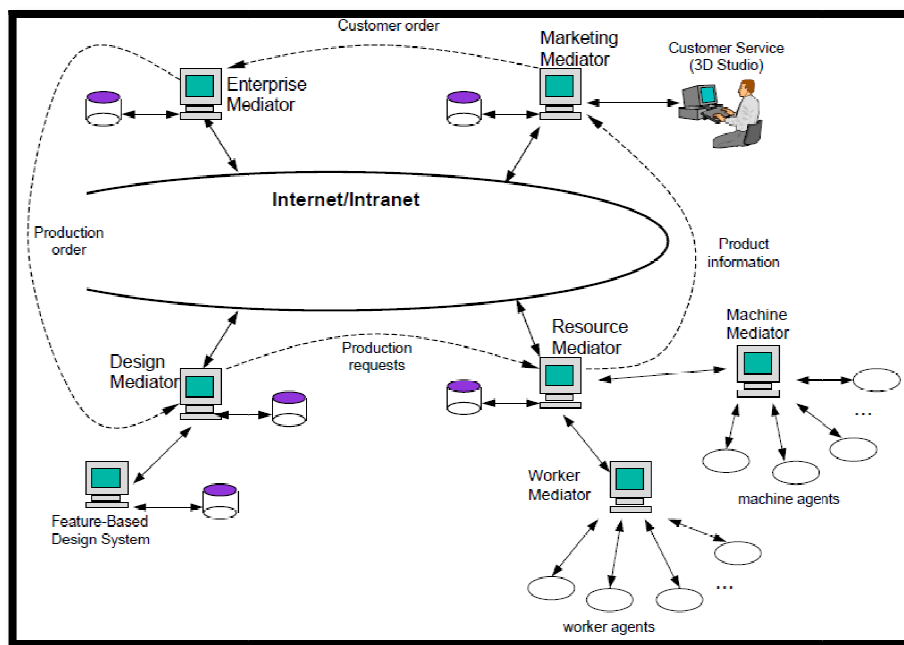
#### **4.3.1. Sistemas Multiagente en la Gestión de la Cadena de Suministro.**

Fox et al. (1993) fueron pioneros en la propuesta de la organización de la cadena de suministro como una red de agentes inteligentes cooperantes. En su trabajo, cada agente ejecuta diversas funciones de la cadena de suministro, coordinando sus acciones con el resto de agentes.

Algo más tarde, Swaminathan et al. (1996) también utilizaron una arquitectura multiagente para modelar la dinámica de la cadena de suministro. A diferencia del trabajo de Fox et al., distinguieron dos categorías de elementos en la simulación de la cadena de suministro: elementos estructurales, que son los involucrados en la producción y el transporte (detallistas, fábricas, distribuidores y agentes de transporte); y elementos de control (inventario, demanda, suministro, flujo y controles de información). Los primeros son modelados como agentes, mientras que los segundos son utilizados para ayudar en la coordinación del flujo de productos de forma eficiente.

Shen et al. (1998) desarrollaron la herramienta MetaMorph II, que, a través de una arquitectura basada en agentes, integra socios, suministradores y clientes dinámicamente con una empresa principal por medio de sus respectivos mediadores, dentro de una red de cadena de suministro vía Internet. Los autores, en el citado trabajo,

utilizan los agentes para representar recursos de producción y piezas, para encapsular los sistemas software existentes, para funcionar como mediadores de sistemas y para realizar funciones de la cadena de suministro. El esquema propuesto se recoge en la *figura 4.7*.



*Figura 4.7. Modelo multiagente implementado en MetaMorph II (Fuente: Shen et al., 1998).*

Kimbrough et al. (2002) estudiaron si una estructura basada en agentes podía ser válida para la gestión de la cadena de suministro, llegando a la conclusión de que los agentes eran capaces de jugar al “Juego de la Cerveza” con eficacia. Estos permitían realizar un seguimiento de la demanda, eliminar el Efecto Bullwhip y determinar las mejores políticas para los distintos miembros de la cadena de suministro, incluso en entornos gobernados por un elevado grado de complejidad y dinamismo.

Moyaux et al. (2004) también utilizaron un sistema multiagente para modelar en comportamiento de cada compañía en la cadena de suministro. El trabajo plantea una variante del “Juego de la Cerveza”, a la que llama “Juego del Suministro de Madera de Québec”, detallando las ecuaciones que guían las decisiones cada agente, y llegando a la conclusión de que a cada compañía en particular le interesa buscar una colaboración con el resto, ya que una política distinta termina produciendo mayores gastos a la compañía. Se basa en la lógica del equilibrio de Nash<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> En Teoría de Juegos, se denomina “equilibrio de Nash” a una solución de un juego con varios jugadores en la que cada jugador adopta la estrategia que más le conviene, dadas las estrategias del resto. Pero eso no significa que sea la mejor solución para el global de los jugadores, pudiendo incluso

Mangina y Vlachos (2005) realizaron una revisión de la aplicación de agentes inteligentes a la optimización de la cadena de suministro. Además, proponen un sistema multiagentes que optimiza el desarrollo de una red logística de bebidas, planteando la forma en que los agentes pueden ayudar a la resolución de problemas específicos como el Efecto Bullwhip.

Liang y Huang (2006) desarrollaron, basándose en una arquitectura multiagente, un modelo que permitía pronosticar la cantidad de pedido a realizar en una cadena de suministro con varios eslabones, donde cada uno de ellos podía utilizar un sistema diferente de inventario. Para realizar dicha previsión, se utilizaba un algoritmo genético<sup>28</sup> cuyos operandos de selección, cruce y mutación actuaban conforme a una base de datos centralizada, y la función de costes buscaba minimizar los costes globales de la cadena, alcanzando además la reducción del Efecto Bullwhip.

De la Fuente y Lozano (2007) presentaron una aplicación de la Inteligencia Distribuida para disminuir el Efecto Bullwhip en una cadena de suministro. En el sistema multiagentes, utilizaron un algoritmo genético, que se ejecuta en varias plataformas diferentes y que toma la decisión de fabricar, enviar o recibir determinadas cantidades de producto. Demostraron que el Efecto Bullwhip disminuye de forma considerable al utilizar herramientas avanzadas de previsión.

Zarandi et al. (2008) introducen la Lógica Difusa<sup>29</sup> en el análisis. Construyeron un sistema basado en agentes para gestionar la cadena de suministro, y demostraron su validez de cara a la previsión de las demandas, la determinación de la política óptima de cada agente y, consecuentemente, la reducción del Efecto Bullwhip. A diferencia de otros trabajos, se basa en técnicas de Lógica Difusa para simular el Efecto Bullwhip en un entorno completamente borroso. La *figura 4.8* recoge el modelo propuesto.

---

existir otra solución global que proporcione mejores resultados a todos los jugadores. En estas condiciones, en el equilibrio de Nash, ningún jugador tiene incentivos para modificar individualmente su estrategia, pero sí que hay incentivos para modificarlas conjuntamente.

<sup>28</sup> Un algoritmo genético es una técnica para introducir inteligencia en un sistema multiagente, que busca la solución óptima para una solución determinada, tratando de imitar la evolución biológica. Parten de un conjunto de soluciones posibles, que evalúan en torno a una función a optimizar, y se realizan sucesivas iteraciones, quedándose con las soluciones óptimas de cada una de ellas y combinando (operaciones de selección, cruce y mutación) el resto en busca de nuevas soluciones.

<sup>29</sup> La Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) es una rama de las matemáticas que se basa en lo relativo de lo observado como posición diferencial. Es decir, se basa en llevar el estudio desde un punto de vista cuantitativo hasta un enfoque cualitativo, agrupando los distintos valores numéricos en conjuntos (*sets*), a través de funciones probabilísticas. La Lógica Difusa tiene múltiples aplicaciones en Inteligencia Artificial, principalmente en lo relativo al control de procesos complejos, como ayuda en el proceso de toma de decisiones.

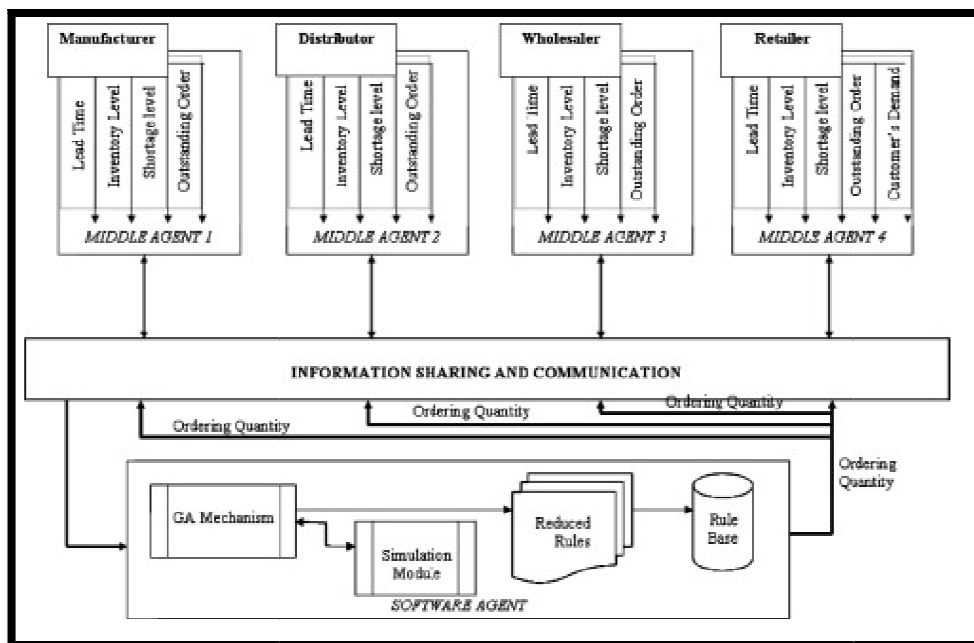


Figura 4.8. Arquitectura multiagente utilizada por Zarandi et al. (Fuente: Zarandi et al., 2008).

Bahroun et al. (2010) proponen, basándose en una arquitectura multiagente, un modelo genérico que permite simular las cadenas de suministro y evaluar las políticas de reposición de los distintos agentes. Para la validación del modelo propuesto, se basan en el “Juego de la Cerveza”. Demuestran la adecuación del sistema desarrollado para la optimización de la cadena de suministro, alcanzándose grandes disminuciones en el Efecto Bullwhip.

Wu et al. (2011) aplican la metodología multiagente para establecer un modelo de cadena de suministro y analizar con detalle el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la misma, considerando la no existencia de intercambio de información entre los distintos miembros. El trabajo defiende que la cadena de suministro se ha convertido en un sistema complejo, que requiere de metodologías modernas para su análisis, en busca de la optimización de su gestión.

Uno de los últimos estudios al respecto, es el de Saberi et al. (2012) que se basa en la hipótesis de la coordinación entre los distintos miembros de la cadena de suministro como una de las mejores soluciones para reducir el Efecto Bullwhip. A partir de ahí, desarrolla un sistema multiagente, que comunica los distintos agentes que lo forman, haciendo énfasis en la faceta colaborativa. Los agentes se coordinan para controlar inventarios y minimizar el coste total de la gestión de la cadena de suministro, mostrando resultados muy superiores a los de la cadena de suministro tradicional no colaborativa.

Otros estudios relevantes y recientes que utilizan la metodología multiagente para gestionar la cadena de suministro son los de Akanle y Zhang (2008), Jain y Deshmukh (2009), Xu et al. (2010), Kim y Cho (2010), Hernández et al. (2011), y Moncayo – Martínez y Zhang (2011).

#### **4.3.2. Simulaciones No Inteligentes de la Cadena de Suministro.**

La simulación digital es una técnica que permite imitar en un ordenador el comportamiento de un determinado sistema real. Aunque ésta se ha venido utilizando desde hace varias décadas, las continuas evoluciones de la informática aumentan exponencialmente sus aplicaciones. Permite estudiar, sobre sistemas muy complejos, el efecto de pequeños cambios que en condiciones reales no sería viable analizar<sup>30</sup>.

Dado que en este trabajo también llevamos a cabo un análisis del Efecto Bullwhip utilizando la herramienta de simulación ARENA, para finalizar este apartado vamos a exponer una breve revisión bibliográfica sobre simulaciones no inteligentes en el ámbito de la cadena de suministro. Las denominamos “no inteligentes” para contraponerlas con los sistemas multiagente expuestos en el apartado 4.3.1<sup>31</sup>. Sin embargo, en este caso nos referiremos a simulaciones que no introduzcan inteligencia al modelo, de forma que los agentes no tengan capacidad de decisión en busca de una solución óptima, sino que se limiten a seguir una secuencia de operaciones programada. Estas simulaciones son utilizadas principalmente para analizar las consecuencias del cambio de determinadas variables sobre el Efecto Bullwhip, es decir, para el estudio de sus causas, lo cual también permite proponer nuevas soluciones.

Manyem y Santos (1999) simularon una cadena de suministro de dos únicas etapas, con el objetivo de estudiar la propagación del Efecto Bullwhip entre dos niveles consecutivos y, a partir de ello, el impacto del Efecto Bullwhip en la rentabilidad empresarial. Se centraron en las consecuencias del aumento del tiempo de suministro,

---

<sup>30</sup> Este hecho obedece principalmente a tres tipos de motivos: duración, coste y peligrosidad. Si se desea analizar si, por ejemplo, para un sistema de colas en una sucursal bancaria, el tiempo de espera medio en la cola que se lograría aumentando el personal, no tendría sentido llevar a cabo el experimento en condiciones reales, ya que se estadísticamente se requeriría mucho tiempo para extraer conclusiones fiables. Si, como otro ejemplo, una empresa desea valorar si es interesante la compra de una máquina, no tiene sentido comprar la máquina para comprobar las mejoras que ésta introduce al proceso productivo, por motivos de coste. Si, por último, se desea evaluar el efecto del aumento o disminución de las medidas de seguridad en un determinado dispositivo, supondría un riesgo llevar a cabo el análisis en condiciones reales. En estos tres ejemplos, representativo cada uno de ellos de los tres motivos principales, las herramientas de simulación son aconsejables.

<sup>31</sup> Al fin y al cabo, los sistemas multiagente también se basan en la simulación de la cadena de suministro.

demostrando que aportaba una gran incertidumbre a la cadena, que suponía graves perjuicios en su rendimiento.

Merkuryev et al. (2002) simularon, utilizando ARENA 5.0, una cadena de suministro de cuatro niveles y describieron el impacto en el Efecto Bullwhip de las dos políticas principales de gestión de la información en la cadena<sup>32</sup> –información centralizada e información descentralizada– combinado con dos políticas de gestión de inventario<sup>33</sup> –políticas *min-max* y *stock-to-demand*–. De esas combinaciones surgieron cuatro modelos distintos, llegando a la conclusión de que el Efecto Bullwhip aparecía en todos los casos, pero no en la misma medida, demostrando que la política de información centralizada y la política de *stock-to-demand* dan mejores resultados en términos de reducción del Efecto Bullwhip, según se ve en la figura 4.9.

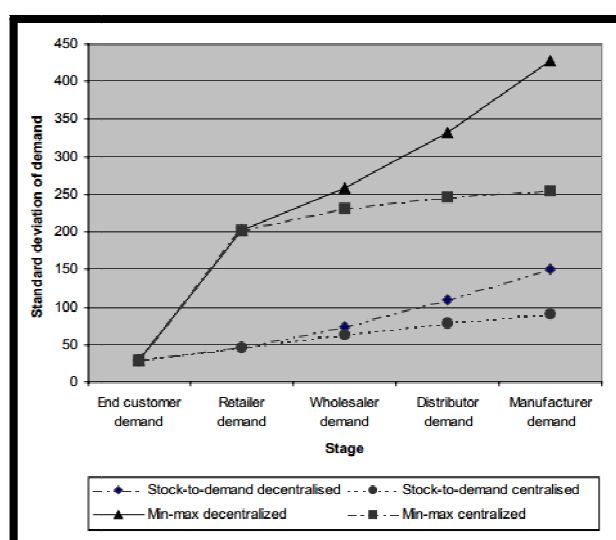


Figura 4.9. Combinación de las políticas de gestión de información y gestión de inventario en el análisis de Merkureyev et al. (Fuente: Merkureyev et al., 2002).

Boute y Lambrecht (2009) simularon la cadena de suministro a través de una extensa hoja de cálculo, orientándose a analizar la relación entre el nivel de servicio al cliente y el Efecto Bullwhip. Para ello, estudiaron diversos cambios en los parámetros que definen las políticas de reaprovisionamiento de los distintos niveles. Los autores llegaron a la conclusión de que el Efecto Bullwhip puede reducirse, aún aumentando las fluctuaciones en los inventarios, pero a costa de disminuir el nivel de servicio al cliente.

<sup>32</sup> En la política de información centralizada, todos los agentes tienen acceso a los datos sobre la demanda final del cliente, mientras que en la política de información descentralizada, cada nivel de la cadena de suministro solo se comunica con el inmediatamente inferior y superior.

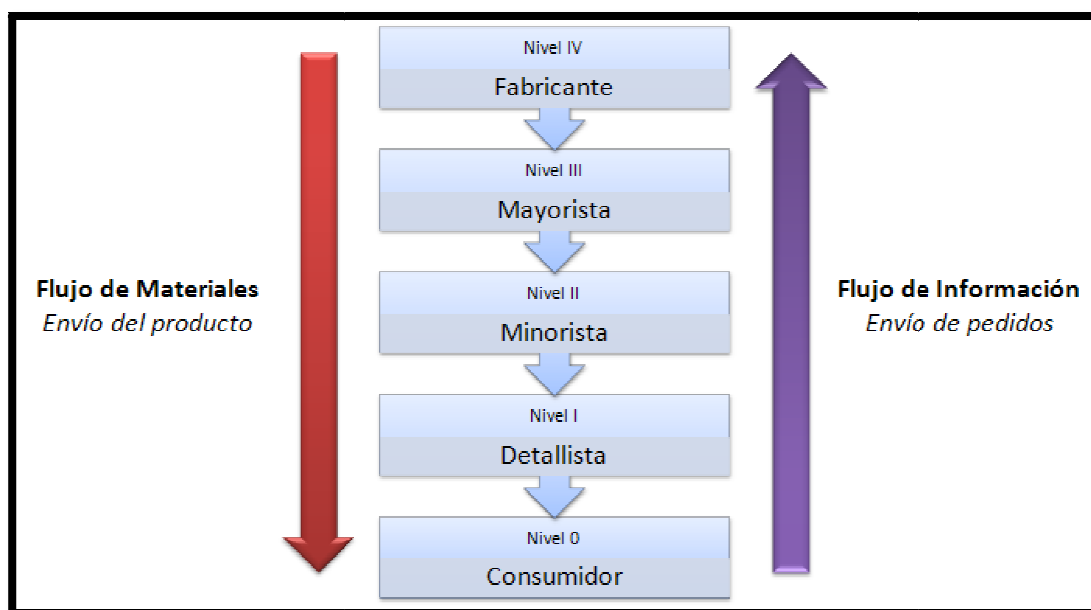
<sup>33</sup> En la política *min-max*, cada nivel realiza un pedido cuando el nivel de inventario alcanza un punto mínimo. En la política *stock-to-demand*, se realiza un pedido en intervalos fijos de tiempo. En ambos casos, la cantidad de pedido obedece a llevar el nivel de inventario hasta un cierto nivel objetivo.



## 5. APROXIMACIÓN EMPÍRICA: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

### 5.1. Introducción: Sistema Global Multiagente.

Para la elaboración del modelo base, se ha considerado una cadena de suministro tradicional de estructura lineal formada por cinco niveles principales: Cliente, Detallista, Minorista, Mayorista y Fabricante. La *figura 5.1* recoge una representación esquemática de los niveles considerados, indicando tanto el flujo de materiales –a través del envío del producto, también denominado flujo aguas abajo, ya que se produce desde los niveles superiores hasta los niveles inferiores de la cadena de suministro– hasta el flujo de información –a través del envío del pedido, también denominado flujo aguas arriba, ya que se produce desde los niveles inferiores hasta los niveles superiores de la cadena de suministro–.



*Figura 5.1. Modelo de la cadena de suministro utilizada, con los dos flujos principales (Fuente: Elaboración Propia).*

La metodología seleccionada en esta investigación para el análisis empírico del Efecto Bullwhip es la Inteligencia Artificial Distribuida, a través de un sistema multiagente. De esta forma, modelaremos la cadena de suministro como una estructura formada por un conjunto de agentes inteligentes, interactuando entre ellos en un entorno definido pero

incierto, siendo capaces todos ellos de realizar acciones autónomas y flexibles que afectan al citado entorno.

Esta decisión se justifica en torno a las razones expuestas en el apartado 4.3 que han llevado a múltiples autores a analizar el Efecto Bullwhip, y la gestión de la cadena de suministro de forma genérica, a través de la metodología multiagente. De esta forma, destacamos los siguientes motivos como los que nos han llevado a la utilización de esta técnica:

- La gestión de la cadena de suministro es un problema físicamente distribuido, englobando varias organizaciones independientes, cada una de ellas trabajando en unas condiciones claramente diferenciadas, aunque relacionadas, de las del resto.
- Se puede esquematizar un patrón general de toma de decisiones en las distintas organizaciones en lo relacionado con la gestión de la cadena de suministro, de forma que el análisis individual tan solo requiera ciertas variaciones entre los distintos niveles.
- Cada agente ha de tomar decisiones considerando sus intereses individuales, pero también los de la cadena porque esta situación, como se demuestra en este trabajo, permite desembocar en unos claros beneficios para todos los miembros de la cadena de suministro. Así, se vuelve inevitable, en la búsqueda de una mayor aproximación a la realidad, utilizar una técnica que permita conectar la toma de decisiones en los distintos agentes que la engloban.
- La gestión de la cadena de suministro es un problema de elevada complejidad, influenciado por un entorno fuertemente incierto y dinámico, y condicionado por multitud de variables. La consideración de su análisis como la suma de un conjunto de problemas de menor dimensión facilita considerablemente el estudio.

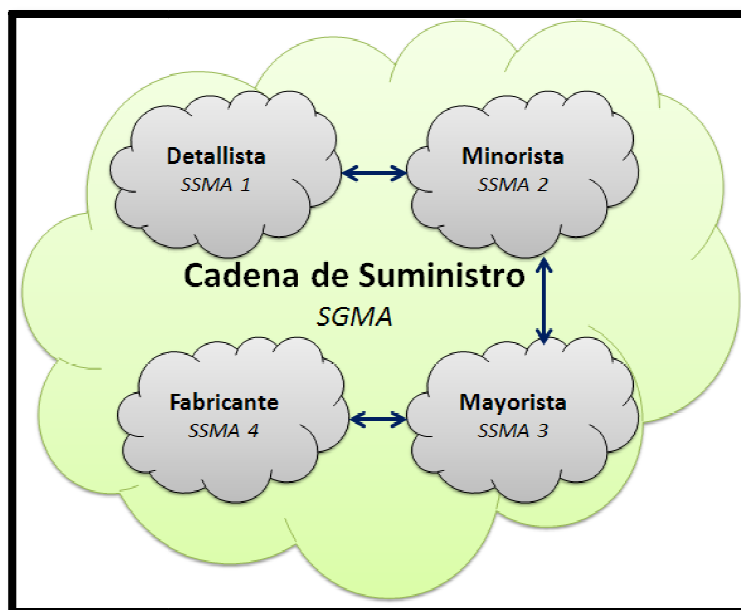
De esta forma, la cadena de suministro será representada como un Sistema Global Multiagente (que denominaremos SGMA), con cuatro agentes principales, relacionado cada uno de ellos con los niveles principales de la cadena de suministro: Detallista, Minorista, Mayorista y Fabricante.

En nuestro caso, consideramos agentes estáticos, ya que no se desplazan por la red, que poseen un modelo de razonamiento interno comprometido con la planificación y la negociación, buscando la coordinación con otros agentes. Así, cada agente posee un

conocimiento incompleto del problema, con los datos descentralizados, ya que cada agente tiene acceso a un conjunto de información limitada, de forma que no hay un control global del sistema.

A su vez, el comportamiento de cada uno de los cuatro niveles principales de la cadena de suministro (Detallista, Minorista, Mayorista y Fabricante) será simulado a través de un Subsistema Multiagente (que llamaremos SSMA 1, SSMA 2, SSMA 3 y SSMA 4). Entonces, cada agente que conforma el Sistema Global Multiagente lo podemos considerar en sí también un sistema multiagente, ya que está formado por distintos agentes inteligentes que también interactúan entre ellos, buscando satisfacer unos objetivos predefinidos.

La *figura 5.2* muestra, a modo de síntesis, el Subsistema Global Multiagente, constituido, a su vez, por los cuatro Subsistemas Multiagente, cada uno de ellos asociado a uno de los principales niveles de la cadena de suministro.



*Figura 5.2. Modelo general del Sistema Global Multiagente (Fuente: Elaboración Propia).*

Esta esquematización permite que el Sistema Multiagente Global posea unas características similares a una cadena de suministro en condiciones próximas a la realidad, como:

- Autonomía: un nivel decide y ejecuta sin necesidad de intervención externa.
- Capacidades sociales: cada nivel se comunica con el resto.
- Reactividad: cada nivel modifica su comportamiento en función del entorno.

También, a modo de conclusión, el enfoque basado en agentes presenta algunas ventajas a mencionar sobre la utilización de otros enfoques tradicionales en la gestión de la cadena de suministro, como puede ser:

- Incremento del grado de reacción de los niveles a los requisitos del mercado,
- Asignación efectiva de recursos,
- Gestión dinámica de materiales e inventario,
- Incremento de la eficiencia del intercambio y realimentación de la información.

## 5.2. Subsistemas Multiagente.

De acuerdo a lo expuesto en el apartado anterior, cada Subsistema Multiagente replicará el comportamiento de uno de los cuatro niveles principales a considerar de la cadena de suministro. Cada uno de ellos tendrá unas metas fijas, que tratará de cumplir lo mejor que sea posible, dadas unas ciertas condiciones en su entorno. A su vez, éste estará formado por distintos agentes inteligentes intercomunicados.

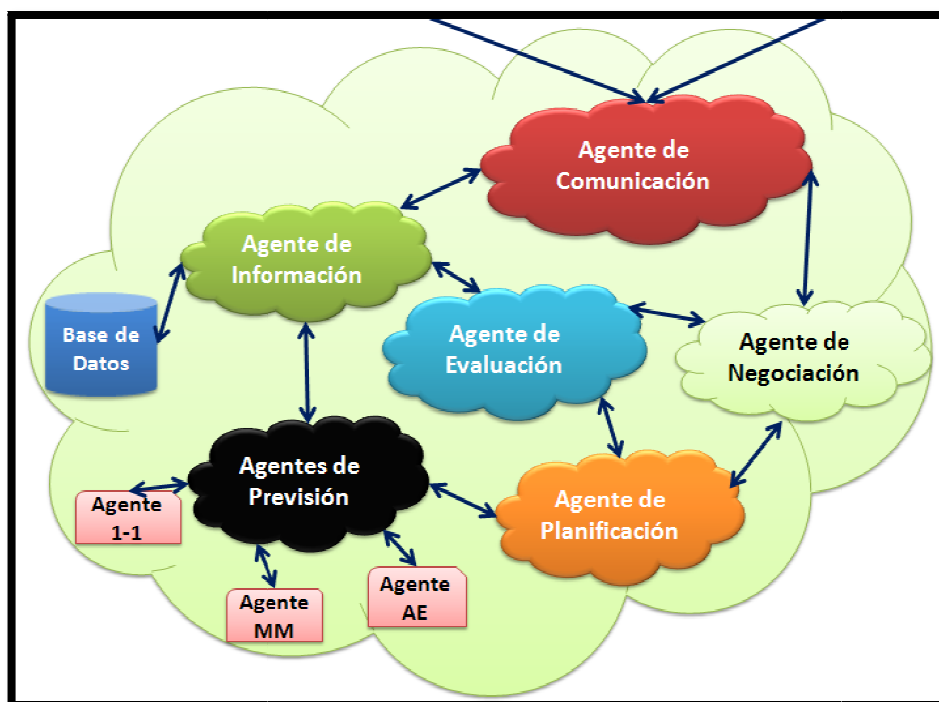


Figura 5.3. Detalle del Subsistema Multiagente en cada nivel de la cadena (Fuente: Elaboración Propia).

La figura 5.3 muestra el detalle de la estructura interna de un Subsistema Multiagente. En ella, se pueden observar seis tipos principales de agentes:

- Agente de Información,
- Agente de Comunicación,

- Agentes de Previsión –que, a su vez, engloban tres agentes según el método de previsión de la demanda utilizado–,
- Agente de Planificación,
- Agente de Evaluación,
- Agente de Negociación.

El mismo esquema también ilustra la existencia de una base de datos, donde se almacenará la información más relevante de cada subsistema.

A continuación, se detalla el funcionamiento de los distintos agentes que forman cada nivel de la cadena de suministro.

### **5.2.1. Agente de Información.**

La base de datos asociada a cada Subsistema Multiagente almacenará una serie de datos temporales correspondientes al nivel de la cadena de suministro asociado. Éstos engloban principalmente información sobre:

- Las demandas recibidas (pedidos recibidos del nivel inferior de la cadena de suministro).
- Las previsiones de las demandas realizadas, además del método óptimo de previsión para el citado agente en las condiciones definidas.
- La situación del inventario, al principio y al final de los periodos a considerar.
- Los envíos realizados al nivel inferior de la cadena de suministro.
- Los pedidos a realizar al nivel superior de la cadena de suministro.

De esta forma, el Agente de Información tiene como principal objetivo la mediación entre la base de datos y el resto de agentes del Subsistema Multiagente. Así, éstos no ven una base de datos, sino a otro agente, alcanzando la homogeneidad en el sistema.

En estas condiciones, el Agente de Información únicamente responderá a las peticiones de información del resto de agentes, así como almacenará la que éstos generen. Más en detalle, por un lado, almacenará la información sobre la demanda del nivel inferior que le llega del Agente de Comunicación y la información generada por el Agente de Evaluación, como el correspondiente a la previsión más adecuada para el nivel. Por otro lado, proporcionará la información de la demanda recibida a los Agentes de Previsión y la información de los pedidos realizados al nivel superior de la cadena de suministro, a través del Agente de Comunicación.

### **5.2.2. Agente de Comunicación.**

El Agente de Comunicación será el encargado de llevar a cabo las interacciones del Subsistema Multiagente a considerar con el resto con los que se comunique. Éste será su único objetivo. Funciona, de esta manera, a modo de portavoz. Las comunicaciones entre los distintos niveles de la cadena de suministro se llevarán a cabo únicamente a través de los Agentes de Comunicación. Cada uno operará, así, en doble sentido:

- Transmitirá las órdenes de pedido recibidas por los agentes de su mismo nivel –a través del Agente de Información– al nivel superior de la cadena de suministro.
- Recopilará las órdenes de pedido recibidas desde el nivel inferior y se las proporcionará –también a través del Agente de Información– al resto de agentes de su mismo nivel.

Por otro lado, el Agente de Comunicación actúa de intermediario entre el subsistema multiagente y el usuario, de forma que el resto de agentes no se dirijan directamente al usuario. Este agente se comunica con el usuario a través de un interfaz gráfico, con un doble objetivo:

- Permitir al usuario la introducción de información que pueda condicionar el entorno de los agentes (como, por ejemplo, la demanda final del cliente o la activación o no del Agente de Negociación).
- Mostrar al usuario la información más relevante sobre la gestión de la cadena de suministro (pedidos realizados, nivel de inventario, Efecto Bullwhip generado...).

### **5.2.3. Agentes de Previsión.**

Los Agentes de Previsión son el verdadero núcleo del sistema. Cada uno de ellos llevará a cabo los cálculos de las previsiones de la demanda para futuros periodos en base a un método prefijado. Todos los métodos de previsión se basan en los datos históricos almacenados sobre las demandas soportadas por el nivel, para lo cual requieren recibir la información correspondiente del Agente de Información. A su vez, enviarán el resultado de las previsiones al Agente de Planificación, como paso previo al Agente de Evaluación, que tomará la decisión sobre el método de previsión óptimo en términos de Efecto Bullwhip.

Inicialmente, el sistema está formado por tres agentes, pero se trata de un grupo abierto, de forma que en el futuro se puedan añadir nuevos métodos de previsión, aumentando así las capacidades del sistema.

El Agente 1-1 realizará las previsiones según el modelo 1-1, que se basa en estimar la demanda en cualquier periodo como la demanda en el periodo anterior. Se puede expresar como:

$$\hat{D}_t^n = D_{t-1}^n \quad [Ec. 5]$$

; donde  $\hat{D}_t^n$  es la previsión de la demanda en el periodo  $t$  para el nivel  $n$  de la cadena de suministro, y  $D_{t-1}^n$  es la demanda recibida en el periodo  $t-1$  para ese mismo nivel.

El Agente MM, por otro lado, realizará las previsiones según el método de la media móvil de orden  $n$ , que estima la demanda en cualquier periodo como la media de las últimas  $m$  demandas. Se puede expresar, consecuentemente, como:

$$\hat{D}_t^n = \frac{[D_{t-1}^n + D_{t-2}^n + \dots + D_{t-m}^n]}{m} \quad [Ec. 6]$$

; donde  $\hat{D}_t^n$  es la previsión de la demanda en el periodo  $t$  para el nivel  $n$  de la cadena de suministro,  $m$  es el número de periodos a considerar para la media móvil y  $D_{t-i}^n$  (con  $i \in [1, m]$ ) es la demanda recibida en el periodo  $t-i$  para ese mismo nivel.

El Agente AE, por último, lleva a cabo las previsiones utilizando el método del alisado exponencial simple, que estima la demanda en cualquier periodo como la media ponderada entre la demanda del último periodo y la estimación de la demanda en ese mismo periodo. Se puede expresar como:

$$\hat{D}_t^n = \alpha \cdot D_{t-1}^n + (1 - \alpha) \cdot \hat{D}_{t-1}^n \quad [Ec. 7]$$

; donde  $\hat{D}_t^n$  es la previsión de la demanda en el periodo  $t$  para el nivel  $n$  de la cadena de suministro,  $\hat{D}_{t-1}^n$  es la previsión de la demanda en el periodo  $t-1$  para ese mismo nivel,  $D_{t-1}^n$  es la demanda recibida en el periodo  $t-1$  para ese mismo nivel, y  $\alpha$  es el coeficiente del alisado exponencial o ponderación del error de previsión.

El Agente MM evalúa todas las medias móviles desde  $m=2$  hasta  $m=15$  (para  $m=1$ , coincidiría con el método 1-1), seleccionando, en función de los datos disponibles, la media móvil óptima. El Agente ES evalúa todas las previsiones para los coeficientes desde  $\alpha = 0,1$  hasta  $\alpha = 0,9$ , con saltos de 0,1, seleccionando el coeficiente óptimo. En

ambos casos, se escoge la previsión óptima de acuerdo al criterio del error cuadrático medio, que se desea minimizar, expresando éste, de forma genérica, como:

$$ECM = \frac{1}{p} \sum_{t=1}^p (\widehat{D}_t - D_t)^2 \quad [Ec. 8]$$

; donde  $\widehat{D}_t$  es la previsión de la demanda en el periodo  $t$ ,  $D_t$  es la demanda real en el periodo  $t$  y  $p$  es el número de datos disponibles.

#### 5.2.4. Agente de Planificación.

El Agente de Planificación utiliza la previsión de la demanda óptima ( $\widehat{D}_t^n$ ), de acuerdo al criterio del Error Cuadrático Medio, que proporciona cada uno de los tres Agentes de Previsión para llegar a cabo una planificación temporal, a través del cálculo de cuatro parámetros para cada periodo a considerar:

- La situación inicial del inventario ( $S_{I_t}^n$ ), que es la suma de la situación final del inventario en el periodo anterior ( $S_{F_{t-1}}^n$ ) y los pedidos recibidos al comienzo del periodo, que, considerando un tiempo de suministro unidad (apartado 5.3.3), se suponen son los realizados durante el periodo anterior ( $O_{t-1}^n$ ).

$$S_{I_t}^n = S_{F_{t-1}}^n + O_{t-1}^n \quad [Ec. 9]$$

- La situación final del inventario ( $S_{F_t}^n$ ), que es la diferencia entre la situación inicial del inventario ( $S_{I_t}^n$ ) y la demanda recibida, desde el nivel inferior de la cadena de suministro, en el periodo actual ( $D_t^n$ ), de forma que valores negativos evidencian rotura de stock.

$$S_{F_t}^n = S_{I_t}^n - D_t^n \quad [Ec. 10]$$

- Los envíos realizados a tiempo<sup>34</sup> al nivel inmediatamente inferior de la cadena de suministro ( $Y_t^n$ ), que coincidirán con la demanda del mismo ( $D_t^n$ ) salvo que ésta sea imposible de satisfacer en su totalidad. En este caso, coincidirán con el inventario disponible ( $S_{I_t}^n$ ).

$$Y_t^n = \min \{D_t^n, S_{I_t}^n\} \quad [Ec. 11]$$

- Los pedidos a realizar al nivel superior de la cadena de suministro ( $O_t^n$ ), que se pueden expresar como la diferencia entre la previsión de la demanda ( $\widehat{D}_{t+1}^n$ ) y

<sup>34</sup> Además se enviarán, de acuerdo a las hipótesis base del modelo, los pedidos relacionados con la rotura de stock generada en el periodo anterior, si ésta tuvo lugar.



la situación final del inventario ( $S_{Ft}^n$ ), o nulo, si la diferencia anterior es negativa.

$$O_t^n = \max \{ \widehat{D}_{t+1}^n - S_{Ft}^n, 0 \} \quad [Ec. 12]$$

Los pedidos realizados por cada nivel de la cadena de suministro en el periodo  $t$  ( $O_t^n$ ), a su vez supondrán la demanda del nivel inmediatamente superior de la cadena de suministro en ese mismo periodo ( $D_t^{n-1}$ ), siendo éste el principal nexo que une los distintos niveles de la misma, según se expresa en la *ecuación 13*:

$$O_t^n = D_t^{n-1} \quad [Ec. 13]$$

De esta forma, el Agente de Planificación simula, en todo el intervalo temporal considerado, cada nivel de la cadena de suministro a partir de las demandas disponibles, utilizando las previsiones de la demanda que proporciona cada Agente de Previsión. Así, se disponen de tres escenarios posibles, que valorará el Agente de Evaluación, en busca de aquel que minimice el Efecto Bullwhip generado en la misma.

#### 5.2.5. Agente de Evaluación.

El Agente de Evaluación es el encargado de decidir cuál de los tres escenarios planteados para cada nivel por el Agente de Planificación es el más adecuado, en términos de reducción del Efecto Bullwhip. Así, también proporcionará al Agente de Información los datos necesarios sobre el eslabón para completar la base de datos, que procederán de la planificación óptima.

Si no está activado el Agente de Negociación<sup>35</sup>, el Agente de Planificación seleccionará como previsión óptima para cada nivel de la cadena de suministro a aquella que genera un menor Efecto Bullwhip en el escalón, de acuerdo a la *ecuación 2* (apartado 2.4).

$$EB_n = \frac{\sigma_{dt}^2}{\sigma_{dr}^2} \quad [Ec. 2]$$

De esta forma, se busca minimizar el Efecto Bullwhip global generado en la cadena de suministro, ya que, de acuerdo a la *ecuación 3* (apartado 2.4), éste se puede expresar como el producto del Efecto Bullwhip generado en los distintos niveles.

---

<sup>35</sup> En el apartado 5.2.6 y en el apartado 8.1, se expone con más detalle el papel del Agente de Evaluación cuando se activa el Agente de Negociación.

$$EB = \prod_{n=1}^4 EB_n \quad [Ec. 3]$$

Además, dentro de este agente, se ha incorporado un módulo adicional que permite tener en cuenta lo expuesto en el apartado 2.4, citando algunos autores que consideraban que la anterior definición del Efecto Bullwhip es insuficiente, y que se deben considerar, además, los costes de almacenamiento en relación a los costes de rotura de stock. Para considerar este hecho, la activación de este módulo requiere la introducción, por parte del usuario, de unos costes unitarios de rotura ( $c_{rot}^n$ ) y de unos costes unitarios de almacenamiento ( $c_{alm}^n$ ) en cada nivel  $n$  de la cadena de suministro, que se suponen no variables con el tiempo<sup>36</sup>.

Así, podemos expresar los costes totales por rotura de stock en todo el periodo a considerar ( $p$ ) para el nivel  $n$  ( $CT_{rot}^n$ ) como el producto los costes unitarios ( $c_{rot}^n$ ) por la rotura de stock ( $rs_t^n$ ) en cada caso en que exista rotura de stock<sup>37</sup>, de acuerdo a la *ecuación 14*.

$$CT_{rot}^n = \sum_{t=1}^p (c_{rot}^n \cdot rs_t^n); \text{ con } s_t^n = \max \{0, -S_{Ft}^n\} \quad [Ec. 14]$$

De idéntica forma, se expresan los costes totales de almacenamiento en todo el periodo a considerar ( $p$ ) para el nivel  $n$  ( $CT_{alm}^n$ ) como el producto los costes unitarios ( $c_{alm}^n$ ) por el inventario almacenado ( $s_t^n$ ) en cada caso en que exista inventario almacenado<sup>38</sup>, de acuerdo a la *ecuación 15*.

$$CT_{alm}^n = \sum_{t=1}^p (c_{alm}^n \cdot s_t^n); \text{ con } s_t^n = \max \{0, S_{Ft}^n\} \quad [Ec. 15]$$

---

<sup>36</sup> Como se podrá observar más adelante en la *ecuación 18* y, con más detalle en el apartado 7, la activación de este módulo no requiere la introducción exacta de los costes de almacenamiento y los costes de rotura, sino que lo que realmente precisa el Agente de Evaluación en el proceso de toma de decisiones es el cociente entre ambos, es decir, la importancia relativa de uno respecto a otro. Así, si por ejemplo, el cociente entre los costes es 2, el resultado de la valoración final de acuerdo a la *ecuación 18* será el mismo, independientemente de los valores absolutos de los costes en sí.

<sup>37</sup> De la ecuación 10, se deduce que se produce rotura de stock cuando  $S_{Ft}^n < 0$ , es decir, cuando no hay suficiente inventario inicial para atender a la demanda real recibida en ese periodo. La diferencia será la rotura de stock en ese periodo.

<sup>38</sup> De la misma ecuación 10, se deduce que se almacenará inventario al final del periodo cuando  $S_{Ft}^n > 0$ , es decir, cuando hay suficiente inventario inicial para atender a la demanda real recibida en ese periodo. El restante será el inventario almacenado.

La suma de los dos términos anteriores la podemos considerar como los costes totales de gestión del inventario para el nivel  $n$  ( $CT_{EB}^n$ ), según se expresa en la *ecuación 16*<sup>39</sup>.

$$CT_{EB}^n = CT_{rot}^n + CT_{alm}^n \quad [Ec. 16]$$

A partir de ahí, la activación del citado módulo hace que la minimización del Efecto Bullwhip considere simultáneamente la *ecuación 2* (apartado 2.4) y la *ecuación 15*, de acuerdo con unas ponderaciones introducidas por el usuario, de forma que entre ambas suman 100:

- $P_{EBD}$ , que es la ponderación del cociente relacionado exclusivamente con la variación de la variabilidad de las demandas ( $EB_n$ ).
- $P_{EBS}$ , que es la ponderación del coste total de la gestión de inventario ( $CT_{EB}^n$ ).

En estas condiciones, se llevarán a cabo los cálculos anteriores para la previsión por el método 1-1 y para la mejor previsión para cada uno de los otros dos métodos de previsión (media móvil y alisado exponencial), generándose:

- $EB_n(11)$  y  $CT_{EB}^n(11)$  como los resultados obtenidos en el nivel  $n$  de la cadena de suministro con el método 1-1 de previsión.
- $EB_n(mm)$  y  $CT_{EB}^n(mm)$  como los resultados obtenidos en el nivel  $n$  de la cadena de suministro con la media móvil óptima, según el Agente de Previsión asociado.
- $EB_n(ae)$  y  $CT_{EB}^n(ae)$  como los resultados obtenidos en el nivel  $n$  de la cadena de suministro con el alisado exponencial con coeficiente óptimo, según el Agente de Previsión asociado.

De esta forma, se definen los resultados mínimos para cada nivel de la cadena de suministro como el menor de los tres anteriores en cada caso, de acuerdo a la *ecuación 17* y a la *ecuación 18*:

$$EB_n(min) = \min\{EB_n(11), EB_n(mm), EB_n(ae)\} \quad [Ec. 17]$$

$$CT_{EB}^n(min) = \min\{CT_{EB}^n(11), CT_{EB}^n(mm), CT_{EB}^n(ae)\} \quad [Ec. 18]$$

---

<sup>39</sup> Nótese que no se consideran otros costes que tradicionalmente se tienen en cuenta en la gestión de inventarios. El motivo es que, dadas las hipótesis planteadas, estos otros costes no afectan al proceso de toma de decisiones. Por ejemplo, no se tienen en cuenta los costes de emisión de pedido, ya que se realiza un pedido en cada periodo, por lo que el número total de pedidos es el mismo en todos los casos y el coste global por emisión de pedidos se considera constante. Tampoco se consideran los costes de adquisición, porque éstos se asumen invariables con el tiempo, y la cantidad total a pedir no varía, por lo que el coste de adquisición total también es constante.

Estos cálculos nos permiten valorar cada una de las tres alternativas (donde  $i \in \{11, mm, ae\}$ ) con la *ecuación 19*, en una escala de 0 a 100. El Agente de Evaluación seleccionará, cuando se encuentre activado el citado módulo, como alternativa óptima aquella que obtenga una valoración superior en la escala de medición.

$$Valoración(i) = P_{EBD} \cdot \frac{EB_n(min)}{EB_n(i)} + P_{EBS} \cdot \frac{CT_{EB}^n(min)}{CT_{EB}^n(i)} \quad [Ec. 19]$$

Nótese que, según la *ecuación 19*, si uno de los tres métodos obtiene el mejor resultado en ambos criterios (es decir,  $EB_n(i) = EB_n(min)$  y  $CT_{EB}^n(i) = CT_{EB}^n(min)$ ), ambos cocientes de la expresión valdrán 1, y la valoración será la máxima, 100, ya que la suma de ambas ponderaciones, de acuerdo a lo especificado, tomará este valor.

#### 5.2.6. Agente de Negociación.

El Agente de Negociación será activado por el usuario, cuando éste lo considere conveniente, desde la interfaz de la herramienta desarrollada. Cuando se encuentre activo, permitirá la gestión de las previsiones de la demanda en la cadena de suministro de forma coordinada a través de la colaboración entre Detallista y Minorista, por un lado, y Mayorista y Fabricante, por otro.

Cada Agente de Negociación entablará un proceso de conversación con el Agente de Negociación con el que se relaciona a través del Agente de Comunicación. El marco colaborativo se basa principalmente en la compartición de información entre los agentes –lo cual altera el flujo de información en la cadena de suministro tradicional expuesto en la *figura 5.1* hasta el punto que Detallista y Minorista, por un lado, y Mayorista y Fabricante, por otro, comparten la información disponible–, con el objetivo de la búsqueda de un equilibrio entre una previsión considerada aceptable en términos locales, y una previsión que sea beneficiosa para la totalidad del sistema, ya que en ocasiones ambos términos pueden entrar en contraposición.

De esta forma, el Agente de Negociación de cada nivel interactúa con el Agente de Planificación y con el Agente de Evaluación, buscando la política óptima que no solo trate de minimizar el Efecto Bullwhip generado en el eslabón, sino que busque la minimización del Efecto Bullwhip global generado en la cadena de suministro. Se trata de un agente abierto a nuevas funcionalidades a incluir en el futuro, según los

requisitos particulares de cada cadena de suministro, buscando una mayor aproximación a la realidad.

### **5.3. Hipótesis de Partida y Posibles Variaciones del Modelo.**

Del modelo expuesto e implementado, se recogen en este apartado, a modo de síntesis, las hipótesis de partida más relevantes asumidas, con las justificaciones de las alternativas seleccionadas, así como la posibilidad de cambios en el modelo, con el objetivo de poder analizar en el futuro las consecuencias de otras variables en la generación del Efecto Bullwhip.

#### **5.3.1. Cadena de Suministro Lineal con Cuatro Niveles.**

Para el análisis del Efecto Bullwhip, nos hemos basado en la estructura de cadena de suministro tradicional, expuesta en la *figura 5.1*, que considera cuatro niveles principales en la misma (Detallista, Minorista, Mayorista y Fabricante) con un único elemento por nivel. En ella, tan solo el fabricante elabora el producto, y el resto se orienta exclusivamente hacia el transporte del material terminado. Se ha optado por esta estructura simple con el objetivo de poder analizar el efecto de las principales variables y extraer conclusiones. De cara a futuros trabajos en la misma materia, se plantea la posibilidad de variación de esta estructura, donde cada nivel pueda estar formado por distintos elementos, o incluso, donde cada nivel pueda llevar a cabo una parte del proceso productivo en sí.

De la misma forma, en general, el modelo trabaja con un sistema de información descentralizada, donde cada nivel solo tiene acceso a la información sobre la demanda del nivel inmediatamente inferior. Esta suposición se basa en la realidad de muchas cadenas de suministro, que operan en estas condiciones. Con el objetivo de valorar una mejora, el Agente de Negociación realiza una variación sobre el esquema de información centralizada, basada en compartir datos entre distintos niveles.

#### **5.3.2. Pedidos No Retirados por los Clientes y Almacenes Ilimitados.**

El modelo desarrollado se basa en que la paciencia de los clientes es máxima en torno a los pedidos realizados. Es decir, se considera que ellos mantendrán su pedido, aunque la gestión de la cadena de suministro sea incapaz de hacérselo llegar en el periodo en el

que lo requieran, y tengan que esperar más tiempo por su llegada. En la misma línea, pero en el caso opuesto, se considera que los almacenes no tienen restricción de capacidad, es decir, que son capaces de almacenar todo lo requerido en cada momento.

El módulo que considera los costes de almacenamiento y de rotura de stock sí que tiene en cuenta, sin embargo, el perjuicio que le genera al cliente este hecho, a través de los costes de rotura de stock, lo cuál permite una mejor aproximación a la realidad. Es una forma de considerar que, aunque su paciencia para un único pedido sea máxima, su lealtad no lo es. Por otro lado, también tiene en cuenta, a través de los costes de almacenamiento, el perjuicio que le genera a la empresa el almacenamiento en sí del producto terminado.

### 5.3.3. Stock de Seguridad Nulo.

En directa consecuencia con la hipótesis anterior, se considera que el stock de seguridad es nulo. No estaría justificado trabajar con stock de seguridad, ya que éste aumentaría considerablemente los costes de almacenamiento, si se descarta el riesgo de que la demanda se vea disminuida por los consumidores que no ven satisfechos su requerimientos en el momento en el que lo desean.

De esta forma, se ha optado por centrar el estudio del Efecto Bullwhip en otras variables más relevantes en su generación, de acuerdo al citado estudio de Lee et al. (1997). En cualquier caso, trabajar con un stock de seguridad no nulo tan solo requeriría actualizar la *ecuación 12* (apartado 5.2.4) hasta la *ecuación 12a*, de forma que el pedido a realizar en cada periodo ( $O_t^n$ ) no solo tenga en cuenta la previsión de la demanda para el citado periodo, sino también el stock de seguridad con el que se desea trabajar en cada nivel  $n$  de la cadena ( $SS^n$ ). Así, se plantea el estudio del efecto del stock de seguridad como posible objetivo de futuras investigaciones al respecto, realizando leves variaciones en el modelo planteado.

$$O_t^n = \max \{SS^n + \widehat{D}_{t+1}^n - S_{Ft}^n, 0\} \quad [Ec. 12a]$$

### 5.3.4. Tiempo de Suministro Unidad.

De acuerdo a lo expuesto, se considera que los pedidos se realizan periódicamente en cada unidad temporal<sup>40</sup>, de forma que cada nivel de la cadena de suministro ya disponga al comienzo del periodo siguiente lo que ha pedido en cada periodo. Es decir, que el tiempo de suministro es una unidad temporal.

Se ha considerado esta hipótesis con el objetivo de facilitar la extracción de conclusiones en torno al efecto de otras variables de mayor relevancia, de acuerdo al análisis de las causas del Efecto Bullwhip llevado a cabo Lee et al. (1997). De cualquier forma, la consideración de un tiempo de suministro distinto, por ejemplo 2, solo requeriría describir la *ecuación 9* (apartado 5.2.4) como la *ecuación 9a*, de forma que la situación inicial del inventario ( $S_{I_t}^n$ ) sea la suma de la situación final del inventario en el periodo anterior ( $S_{F_{t-1}}^n$ ) y los pedidos recibidos al comienzo del periodo, que se suponen son los realizados dos periodos antes ( $O_{t-2}^n$ ). Se abre esta rama como futura posibilidad de análisis del efecto del tiempo de suministro sobre el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro.

$$S_{I_t}^n = S_{F_{t-1}}^n + O_{t-2}^n \quad [Ec. 9a]$$

## 5.4. Implementación del Modelo.

Para la implementación del modelo se ha utilizado NetLogo 5.0.1. NetLogo es un entorno de programación, creado por Uri Wilensky (1999) y en continuo desarrollo por el Centre for Connected Learning and Computer-Based Model, que permite el desarrollo de modelos multiagentes para la simulación y análisis de fenómenos de muy distinta clase.

La *figura 5.4* muestra, a modo de ejemplo, una captura de pantalla de la interfaz del modelo implementado en un instante concreto de una simulación. El núcleo central de la aplicación son la función de inicialización y las que simulan el comportamiento de los distintos miembros de la cadena de suministro, que se activan directamente desde la interfaz. La parte superior izquierda de la misma permite activar los módulos de costes

---

<sup>40</sup> Esta unidad temporal puede considerarse como un día, como una semana o como un mes (o como cualquier otra alternativa), ya que el entorno en que es desarrollado el modelo multiagente (apartado 5.4) no precisa trabajar con una unidad temporal en concreto.

y de negociación cuando se estime conveniente, así como asignar los valores de partida relacionados con los mismos.

El resto de la interfaz recoge los principales resultados. Por un lado, en forma de gráficos, representando la evolución de las demandas de la cadena de suministro para los diferentes casos a analizar. El principal es el gráfico de la parte superior derecha, que representa las distintas órdenes de pedido para la solución encontrada por el modelo multiagente como la óptima, de acuerdo a la minimización del Efecto Bullwhip generado. Los tres gráficos inferiores representan las soluciones si todos los miembros utilizarasen una política 1-1 de previsión, por un lado, una media móvil de orden 3, por otro, y la representación de la demanda del consumidor, en el gráfico de la parte inferior derecha. Además, se pueden ver los resultados de forma numérica, recogiendo, en la parte superior derecha, el valor del Efecto Bullwhip generado en cada caso, y, en la parte central, el método óptimo de previsión para cada nivel de la cadena de suministro. La terminal de instrucciones de la parte inferior proporciona con más detalles los datos numéricos relacionados con el inventario, previsiones, demandas y pedidos realizados por los distintos componentes de la cadena, así como con los costes, cuando este módulo se encuentra activado.

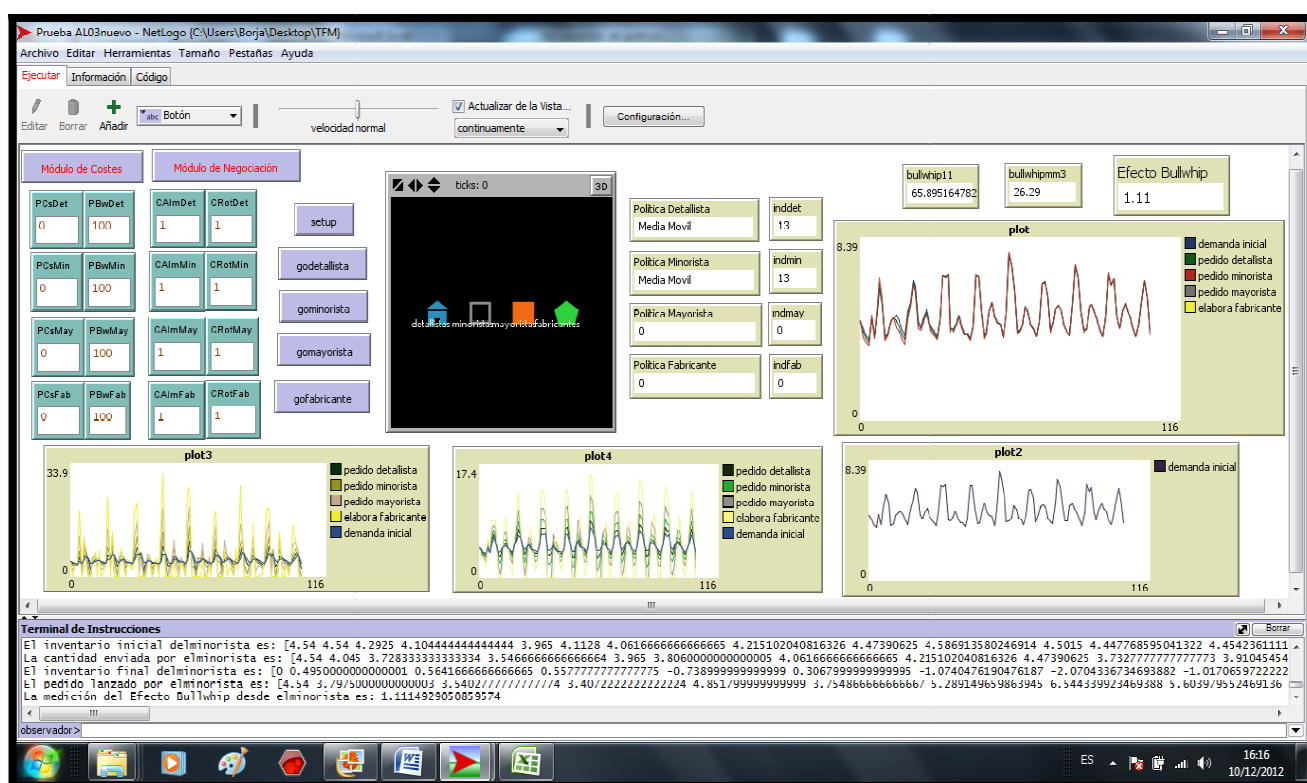


Figura 5.4. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación desarrollada en NetLogo 5.0.1 (Fuente: Elaboración Propia).



#### 5.4.1. Pseudocódigo.

Este apartado recoge, a través del pseudocódigo<sup>41</sup> del programa, la descripción esquemática del algoritmo utilizado en NetLogo 5.0.1 para la implementación del modelo utilizado para simular la cadena de suministro.

La *ventana 5.1* muestra de forma esquemática la estructura general del programa. En primer lugar se ejecuta la función “inicialización”, que define los principales agentes que se utilizarán en él, así como las variables que identifican cada agente, además de preparar el interfaz para que muestre los valores más relevantes. A partir de ahí, se ejecutarán de forma secuencial las funciones “detallista”, “minorista”, “mayorista” y “fabricante”, que, a grandes rasgos, determinan para cada nivel de la cadena de suministro el método óptimo de previsión de la demanda en función de los datos disponibles en cada caso. La estructura de las cuatro funciones es idéntica.

```
call inicialización  
call detallista  
call minorista  
call mayorista  
call fabricante
```

*Ventana 5.1. Pseudocódigo de la estructura general del programa (Fuente: Elaboración Propia).*

La *ventana 5.2* muestra la estructura de la función “minorista”. En primer lugar, guarda en la variable temporal “demanda” el valor de la variable “pedido”, que almacenará el pedido emitido por el nivel de la cadena de suministro más próximo al cliente, ya que “detallista” fue la última función ejecutada. Esta instrucción actúa como una parte del Agente de Comunicación. Posteriormente, actuando como Agente de Información, se almacena en la base de datos del minorista la demanda anterior.

A partir de ahí, se llama a la función “agente11”, que realizará la previsión de la demanda según el método 1-1, y se lleva a cabo la función “agenteplanificación”, que realiza la planificación en torno a esa demanda y la guarda en cuatro variables (apartado 5.2.4). Posteriormente se repite el mismo proceso con los otros dos métodos de previsión (“agenteae” y “agentemm”), de forma que se tienen almacenadas las tres planificaciones. A continuación, la función “agenteevaluación” evaluará las tres planificaciones en torno a los criterios especificados (apartado 5.2.5), y almacenará en

---

<sup>41</sup> El pseudocódigo utiliza lenguaje informático en su objetivo de representar el programa de forma esquemática, pero está diseñado para la lectura y comprensión humana, es decir, es tan solo una simplificación de lo que se ha introducido en la pestaña de código del entorno NetLogo.

la base de datos del nivel la mejor planificación como la planificación del minorista, algo que lleva a cabo el Agente de Información.

Por último, el Agente de Comunicación representa en la interfaz la demanda recibida y transmitida por el nivel, calculando además el Efecto Bullwhip generado (*ecuación 2*, apartado 2.4), y asignando a la variable “pedido” el pedido del nivel, para que pueda utilizar este dato, como demanda, el siguiente escalón de la cadena de suministro.

```
minorista {  
    set demanda=pedido ; Agente de Comunicación  
    set minorista(demanda)=demanda ; Agente de Información  
    call agente11  
    call agenteplanificación  
    set planificación11=planificación  
    call agentemm  
    call agenteplanificación  
    set planificaciónmm=planificación  
    call agenteae  
    call agenteplanificación  
    set planificaciónae=planificación  
    call agenteevaluación  
    set minorista(planificación)=planóptima ; A. de Información  
    show minorista(demanda) ; Agente de Comunicación  
    show minorista(pedido) ; Agente de Comunicación  
    show bullwhip; Agente de Comunicación  
    set pedido=minorista(pedido) ; Agente de Comunicación  
}
```

Ventana 5.2. Pseudocódigo de la estructura de la función “minorista” (Fuente: Elaboración Propia).

La ventana 5.3 muestra el pseudocódigo de la función “agente11”, que realiza la previsión de la demanda en cada periodo de acuerdo a la *ecuación 5* (apartado 5.2.3), almacenándola en la variable “previsión”. Nótese que P hace referencia al intervalo total que se desea simular.

```
agente11 {  
    set i=1  
    while (i<P) {  
        previsión(i)=ecuación5  
        set i=i+1  
    }  
}
```

Ventana 5.3. Pseudocódigo de la estructura de la función “agente11” (Fuente: Elaboración Propia).

La ventana 5.4 muestra el pseudocódigo de la función “agentemm”, que lleva a cabo la previsión de la demanda en cada uno de los periodos consecutivos de acuerdo a la *ecuación 6* (apartado 5.2.3). Se lleva a cabo esta media móvil desde  $n=2$  hasta  $n=15$  y se almacenan las previsiones en variables temporales. Posteriormente, se calcula el error cuadrático medio, según la *ecuación 8* (apartado 5.2.3), de las catorce previsiones

diferentes, escogiendo como mejor previsión aquella con un menor valor de este cociente.

```
agentemm {
  set n=2
  while (n<16) {
    set i=1
    while (i<P) {
      previsionmmn(i)=ecuación6
      set i=i+1
    }
    set n=n+1
  }
  set n=1
  set ecmmin=infinito
  while (n<16) {
    set ecm=ecuación8
    if ecm<ecmmin { ecmmin=ecm & prevision=previsionmmn }
    set n=n+1
  }
}
```

Ventana 5.4. Pseudocódigo de la estructura de la función “agentemm” (Fuente: Elaboración Propia).

La ventana 5.5 contiene el pseudocódigo de la función “agenteae”, que lleva a cabo la previsión de la demanda en cada uno de los periodos consecutivos de acuerdo a la ecuación 7 (apartado 5.2.3). Se lleva a cabo este alisado exponencial desde  $\alpha = 0,1$  hasta  $\alpha = 0,9$ , con saltos de 0,1y se almacenan las previsiones en variables temporales. Posteriormente, se calcula el error cuadrático medio, utilizando la ecuación 8 (apartado 5.2.3), de las nueve previsiones distintas, escogiendo como la mejor aquella con un menor valor del error.

```
agenteae {
  set n=0.1
  while (n<1) {
    set i=1
    while (i<P) {
      previsionaen(i)=ecuación7
      set i=i+1
    }
    set n=n+0.1
  }
  set n=0.1
  set ecmmin=infinito
  while (n<1) {
    set ecm=ecuación8
    if (ecm<ecmmin) { set ecmmin=ecm
                     prevision=previsionmmn }
    set n=n+0.1
  }
}
```

Ventana 5.5. Pseudocódigo de la estructura de la función “agenteae” (Fuente: Elaboración Propia).

La *ventana 5.6* contiene el pseudocódigo de la función “*agenteplanificación*”, que requiere como variables de entrada la previsión de la demanda realizada por un Agente de Previsión y la demanda real recibida, proporcionada por el Agente de Información. En base a ellos, y a partir de lo especificado en el apartado 5.2.4 determina, en cada periodo, el inventario inicial (*ecuación 9*, apartado 5.2.4), el inventario final (*ecuación 10*, apartado 5.2.4), los envíos realizados (*ecuación 11*, apartado 5.2.4) y los pedidos a realizar (*ecuación 12*, apartado 5.2.4). A estas variables, además de a la previsión en sí, las llamamos en la *ventana 5.2* con el nombre genérico de la variable “*planificación*”, por simplificar.

```
agenteplanificacion {  
    set i=1  
    while (i<P) {  
        inventarioinicial(i)=ecuación9  
        inventariofinal(i)=ecuación10  
        envíosrealizados(i)=ecuación11  
        pedidosarealizar(i)=ecuación12  
        set i=i+1  
    }  
}
```

*Ventana 5.6. Pseudocódigo de la función “agenteplanificación” (Fuente: Elaboración Propia).*

La *ventana 5.7* contiene un esquema de la función “*agenteevaluación*”. Si no se activa desde el exterior el módulo que considera los costes de rotura y almacenamiento, ésta función calculará el Efecto Bullwhip (*ecuación 2*, apartado 2.4) generado en el nivel de la cadena de suministro con cada uno de los tres métodos, y seleccionará como mejor planificación aquella con un menor valor del Efecto Bullwhip. Si se activa el citado módulo (apartado 5.2.5), se calculan el Efecto Bullwhip y los costes de gestión para las tres planificaciones, y se selecciona como la planificación óptima, aquella que obtenga una mejor valoración, según la *ecuación 19* (apartado 5.2.5).

```
agenteevaluacion {  
    if (módulorupalm=inactive) {  
        set planificación=planificación11  
        set bw11=ecuación2  
        set planificación=planificaciónmm  
        set bwmm=ecuación2  
        set planificación=planificaciónae  
        set bwae=ecuación2  
        set bullwhip=min{bw11,bwmm,bwae}  
        if (bullwhip=bw11) { set planoptima=planificación11 }  
        if (bullwhip=bwmm) { set planoptima=planificaciónmm }  
        if (bullwhip=bwae) { set planoptima=planificaciónae }  
    }  
    if (módulorupalm=activo) {  
        for (X=11,ae,mm) {  
            set planificación=planificaciónX  
            set bwX=ecuación2  
        }  
    }  
}
```

```
        set costesX=ecuación15
    }
    set bullwhip=min{bw11,bwmm,bwae}
    set costes=min{costes11,costesmm,costesae}
    for (X=11,ae,mm) {
        set bw=bwX
        set costes=costesX
        set evaluaX=ecuación19
    }
    set evaluamax=max{evaluall,evaluamm,evaluaae}
    for (X=11,ae,mm) {
        if (evalua=evaluaX) {
            planoptima=planificaciónX
            bullwhip=bwX
            costes=costesX
        }
    }
}
```

Ventana 5.7. Pseudocódigo de la función “agenteevaluación” (Fuente: Elaboración Propia).

#### 5.4.2. Validación del Modelo.

Para validar el modelo desarrollado e implementado, hemos utilizado una serie temporal con únicamente cinco datos que habitualmente se utiliza en el “Juego de la Cerveza”<sup>42</sup> para ilustrar, entre otros fenómenos relacionados con la gestión de la cadena de suministro, el Efecto Bullwhip.

Supongamos, por ejemplo, que el Detallista parte de un inventario inicial de 100, y que en un primer periodo recibe una demanda del consumidor de 95. En esas condiciones, enviará esas 95 unidades, de forma que el inventario al final del periodo es de 5. Si utiliza el método 1-1 de previsión, requerirá, entonces, 90 unidades al Minorista, ya que prevé la misma demanda para el siguiente periodo. Pero consideremos que en ese segundo periodo la demanda real del consumidor es 80. Esto supone que su inventario final será 15, ya que se ha preparado para tener 95 como inventario inicial. Así, el pedido a realizar para el próximo periodo es de 65 unidades, ya que prevé que la demanda se mantendrá. Si se continúa con este razonamiento durante los cinco periodos temporales a considerar, y se sigue la misma lógica para el resto de niveles –teniendo en cuenta que la demanda de cada nivel son los pedidos realizados por el nivel inmediatamente inferior, se obtienen los resultados recogidos en la *tabla 5.1*. Téngase en cuenta que un inventario final negativo evidencia una rotura de stock. Nótese además que la fila relacionada con los envíos realizados solo considera los realizados a tiempo, es decir, además se cubrirá en ese periodo la rotura de stock del periodo anterior, de

<sup>42</sup> Los datos para la validación se han obtenido de De la Fuente y Lozano (2007).

acuerdo con el modelo presentado en este apartado. La *figura 5.5* representa la variación de las demandas en este caso de los distintos niveles de la cadena de suministro, mientras que la *figura 5.6* muestra las variaciones en el nivel de inventario de los mismos.

	<i>t=1</i>	<i>t=2</i>	<i>t=3</i>	<i>t=4</i>	<i>t=5</i>
<b>Demanda del Consumidor</b>	95	80	80	85	90
<b>NIVEL DETALLISTA</b>	1-1				
Demanda real	95	80	80	85	90
Previsión de la demanda	X	95	80	80	85
Inventario Inicial	100	95	80	80	85
Inventario Final	5	15	0	-5	-5
Envíos realizados	95	80	80	80	85
Pedidos a realizar	90	65	80	90	95
<b>NIVEL MINORISTA</b>	1-1				
Demanda real	90	65	80	90	95
Previsión de la demanda	X	90	65	80	90
Inventario Inicial	100	90	65	80	90
Inventario Final	10	25	-15	-10	-5
Envíos realizados	90	65	65	80	90
Pedidos a realizar	80	40	95	100	100
<b>NIVEL MAYORISTA</b>	1-1				
Demanda real	80	40	95	100	100
Previsión de la demanda	X	80	40	95	100
Inventario Inicial	100	80	40	95	100
Inventario Final	20	40	-55	-5	0
Envíos realizados	80	40	40	95	100
Pedidos a realizar	60	0	150	105	100
<b>NIVEL FABRICANTE</b>	1-1				
Demanda real	60	0	150	105	100
Previsión de la demanda	X	60	0	150	105
Inventario Inicial	100	60	60	150	105
Inventario Final	40	60	-90	45	5
Envíos realizados	60	0	60	105	100
Productos a fabricar	20	0	240	60	95

Tabla 5.1. Resultado de la prueba de validación con el método 1-1 de previsión (Fuente: Elaboración Propia).

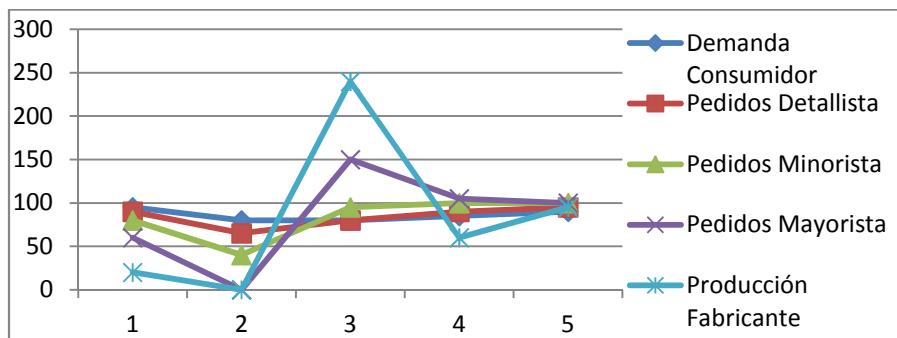


Figura 5.5. Variación de las demandas obtenida utilizando el método 1-1 de previsión (Fuente: Elaboración Propia).

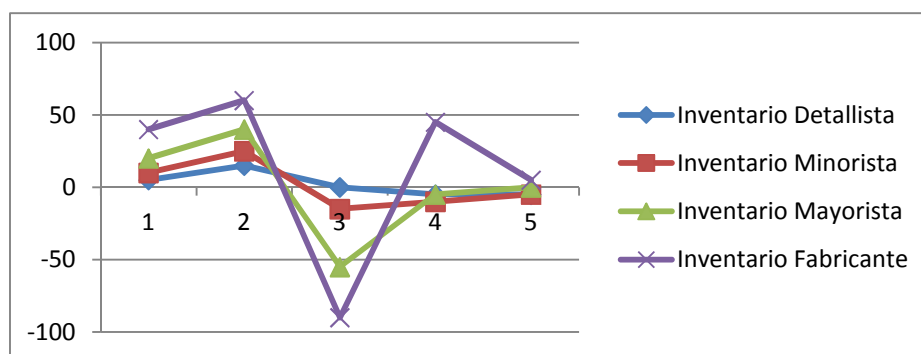


Figura 5.6. Variación de los inventarios obtenida utilizando el método 1-1 de previsión (Fuente: Elaboración Propia).

Por otro lado, la *tabla 5.2* recoge el resultado ofrecido por el modelo multiagente al aplicársele los mismos datos de partida. La mejor política de pedido para el Detallista y para el Minorista es una media móvil de orden 4, mientras que la seleccionada para el Mayorista es un alisado exponencial con parámetro 0,1. Para el Fabricante, lo óptimo es la política 1-1.

	<i>t=1</i>	<i>t=2</i>	<i>t=3</i>	<i>t=4</i>	<i>t=5</i>
<b>Demanda del Consumidor</b>	95	80	80	85	90
<b>NIVEL DETALLISTA</b>	MM n=4				
Demanda real	95	80	80	85	90
Previsión de la demanda	X	95	87,5	85	85
Inventario Inicial	100	95	87,5	85	85
Inventario Final	5	15	7,5	0	-5
Envíos realizados	95	80	80	85	85
Pedidos a realizar	90	72,5	77,5	85	88,75
<b>NIVEL MINORISTA</b>	MM n=4				
Demanda real	90	72,5	77,5	85	88,75
Previsión de la demanda	X	90	81,25	80	81,25
Inventario Inicial	100	90	81,25	80	81,25
Inventario Final	10	17,5	3,75	-5	-7,5
Envíos realizados	90	72,5	77,5	80	81,25
Pedidos a realizar	80	63,75	76,25	86,25	88,44
<b>NIVEL MAYORISTA</b>	AE $\alpha=0,1$				
Demanda real	80	63,75	76,25	86,25	88,44
Previsión de la demanda	X	80	78,38	78,16	78,97
Inventario Inicial	100	80	78,38	78,16	78,97
Inventario Final	20	16,25	2,13	-8,09	-9,47
Envíos realizados	80	63,75	76,25	78,16	78,97
Pedidos a realizar	60	62,13	76,04	87,06	89,38
<b>NIVEL FABRICANTE</b>	1-1				
Demanda real	60	62,13	76,04	87,06	89,38
Previsión de la demanda	X	60	62,13	76,04	87,06
Inventario Inicial	100	60	62,13	76,04	87,06
Inventario Final	40	-2,13	-13,91	-11,02	-2,33
Envíos realizados	60	60	62,13	76,04	87,06
Productos a fabricar	20	64,25	89,95	98,08	91,71

Tabla 5.2. Resultado de la prueba de validación con el modelo multiagente desarrollado (Fuente: Elaboración Propia).

La *figura 5.7*, con datos sobre las demandas, y la *figura 5.8*, con información sobre los inventarios, representan los datos anteriores.

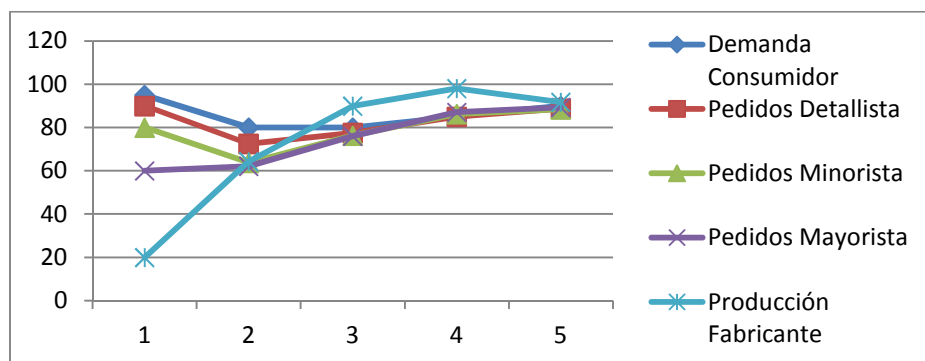


Figura 5.7. Variación de las demandas para la validación con el sistema multiagente desarrollado e implementado (Fuente: Elaboración Propia).

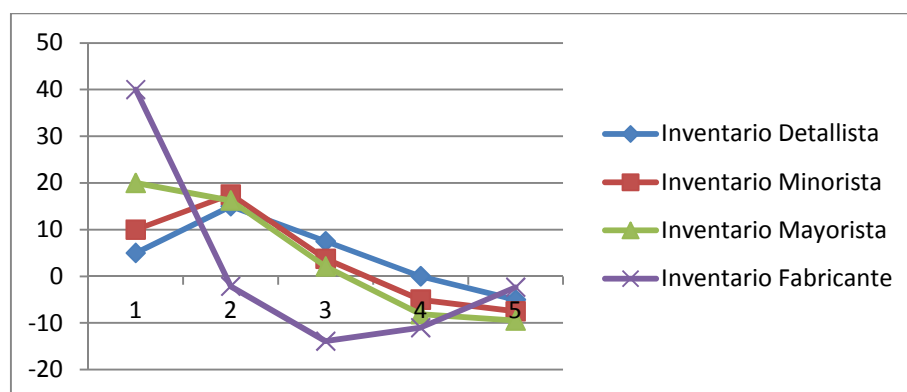


Figura 5.8. Variación de los inventarios con el sistema multiagente desarrollado e implementado (Fuente: Elaboración Propia).

	Método 1-1	Sistema Multiagente
<b>NIVEL DETALLISTA</b>		
Inventario Almacenado Medio	6,67	5,5
Rotura de Stock Media	3,33	1
EB nivel	3,35	1,33
<b>NIVEL MINORISTA</b>		
Inventario Almacenado Medio	7	6,25
Rotura de Stock Media	6	2,5
EB nivel	4,53	1,69
<b>NIVEL MAYORISTA</b>		
Inventario Almacenado Medio	12	7,68
Rotura de Stock Media	12	3,51
EB nivel	4,91	1,49
<b>NIVEL FABRICANTE</b>		
Inventario Almacenado Medio	30	8
Rotura de Stock Media	18	-5,88
EB nivel	2,85	5,58
<b>CADENA DE SUMINISTRO</b>		
Inventario Almacenado Medio	11,13	6,86
Rotura de Stock Media	7,89	3,22
EB total	212,83	24,43

Tabla 5.3. Comparación de resultados en la validación del modelo (Fuente: Elaboración Propia).



Para finalizar la validación del modelo implementado, la *tabla 5.3* compara los resultados obtenidos por ambos métodos. Se puede observar como el modelo multiagente desarrollado logra una espectacular reducción en el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro, definido éste según la *ecuación 1* (apartado 2.4). A partir de ahí, la herramienta utilizada permite reducir más de la mitad la rotura de stock en la cadena de suministro, mientras que el inventario almacenado medio también se reduce significativamente.

Por último, la *figura 5.9*, basada en la *figura 5.5* y en la *figura 5.7*, representa una comparación, expresando ambas gráficas en la misma escala, de las dos soluciones, pudiéndose ver con facilidad, cómo la solución ofrecida por el modelo multiagente reduce considerablemente la amplificación de la variabilidad en las demandas. Por otro lado, la *figura 5.10*, basada en la *figura 5.6* y en la *figura 5.8*, compara ambas soluciones en cuanto al nivel de inventarios, permitiendo observar igualmente, la mejora en los resultados obtenida por el sistema multiagente.

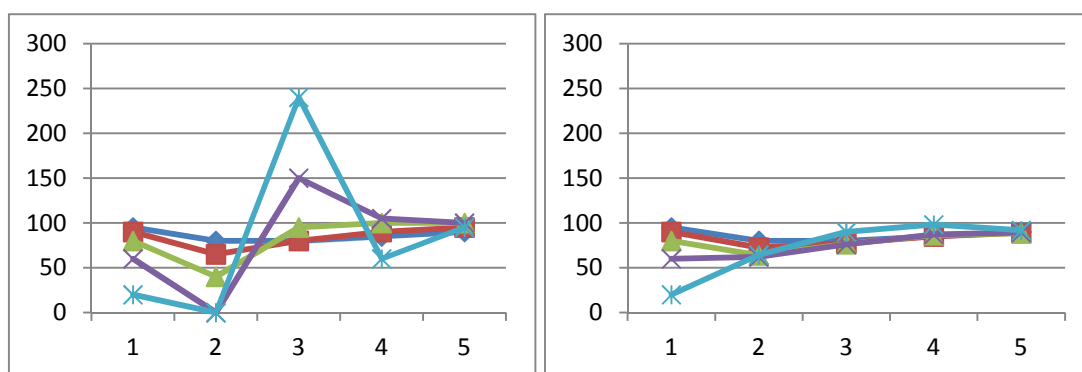


Figura 5.9. Comparación de la variación de las demandas (Fuente: Elaboración Propia).

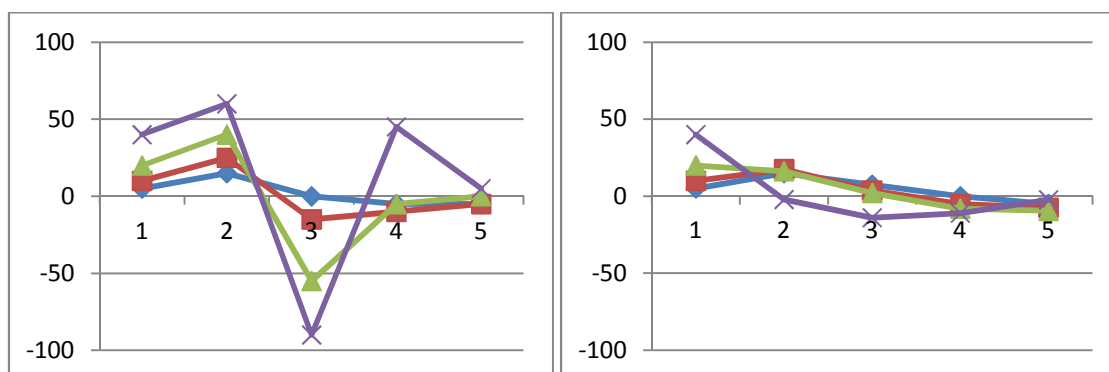


Figura 5.10. Comparación de la variación de los inventarios (Fuente: Elaboración Propia).

## **6. APLICACIÓN NUMÉRICA (I): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS PREVISIONES DE LAS DEMANDAS**

### **6.1. Presentación del Estudio.**

El análisis de Lee et al. (1997) concluye que los errores en las previsiones de los distintos miembros que forman la cadena de suministro son la principal causa de la generación del Efecto Bullwhip a lo largo de la misma, tal y como se expone en el apartado 3.2 de este documento. Consecuentemente, la utilización de métodos avanzados para la previsión de la demanda es un eficaz camino en la mitigación del Efecto Bullwhip.

Bajo estas hipótesis, hemos implementado el modelo expuesto en el apartado 5 con el objetivo de desarrollar una herramienta orientada a la reducción del Efecto Bullwhip generado en las cadenas de suministro, a través de la búsqueda del método óptimo de previsión de la demanda para cada miembro, siempre en función de los datos disponibles.

Así, en este primer apartado analítico, analizaremos el efecto de las previsiones de las demandas en la generación del Efecto Bullwhip, a través de la valoración de la eficacia de la herramienta desarrollada. En primer lugar, llevaremos a cabo la prueba del sistema multiagente sobre demandas aleatorias, para valorar posteriormente su eficacia sobre demandas reales. Por último, valoramos el interés que tendría la incorporación al modelo de sistemas más avanzados de previsión, como las técnicas ARIMA, en el objetivo de disminuir aún más el Efecto Bullwhip generado.

Cabe resaltar que en este análisis nos centraremos sólo en la reducción del Efecto Bullwhip definido según la *ecuación 1* (apartado 2.4), por lo que desactivaremos el módulo relacionado con los costes de almacenamiento de rotura de stock, que tendremos en cuenta en el apartado 7, y el Agente de Negociación, que tendremos en cuenta en el apartado 8.

## 6.2. Pruebas con Demandas Aleatorias.

En primer lugar, se detallan numéricamente algunas pruebas realizadas sobre el modelo multiagente desarrollado, considerando demandas aleatorias, que siguen determinadas distribuciones estadísticas.

Se han utilizado cuatro distribuciones distintas para simular el comportamiento de la demanda, todas con la misma media con el objetivo de poder comparar los resultados:

- $N(100,10)$ : distribución normal con media 100 y desviación típica 10.
- $N(100,1)$ : distribución normal con media 100 y desviación típica 1.
- $P(100)$ : distribución tipo Poisson con media 100.
- $Expo(100)$ : distribución exponencial con media 100.

A su vez, se han utilizado muestras con dos tamaños diferentes: 30 datos y 90 datos. Como combinación de los dos criterios, se han obtenido ocho casos diferentes. Se han realizado tres pruebas para cada uno de ellos, obteniéndose veinticuatro en total.

La *tabla 6.1* recoge los resultados, donde las columnas contienen los siguientes valores: el número de la prueba (Test); la distribución estadística que sigue la demanda (Demanda); el tamaño muestral (Muestra); el Efecto Bullwhip generado en caso de que todos los niveles utilicen el modelo 1-1 de previsión de la demanda (EB1); el Efecto Bullwhip generado en caso de que todos los niveles utilicen una media móvil de tres periodos para la previsión de la demanda (EB2); y el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro con el modelo multiagente desarrollado (EB4)<sup>43</sup>. Cabe matizar que se considera que el inventario inicial en todos los niveles de la cadena coincide con la media de la distribución estadística utilizada.

Los resultados expuestos evidencian, a grandes rasgos, la enorme eficacia del modelo multiagente desarrollado en la reducción del Efecto Bullwhip. Los resultados alcanzados, en términos de Efecto Bullwhip, superan el desempeño ofrecido por el modelo de previsión 1-1 en varios órdenes de magnitud. En comparación con el método de la media móvil, los resultados que se pueden observar también son significativamente mejores.

---

<sup>43</sup> Para comparar los resultados del modelo multiagente desarrollado, se compararán los resultados que ofrece con el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro si todos los miembros utilizan el modelo 1-1 para la previsión de sus demandas, primero, y si todos los miembros utilizan el método de la media móvil (como ejemplo, se ha seleccionado de 3 periodos) en su previsión. En el apartado 5.2.3, se describen ambos métodos con más detalle.

<i>Test</i>	<i>Demanda</i>	<i>Muestra</i>	<i>EB1</i>	<i>EB2</i>	<i>EB3</i>
<b>A-1</b>	N(100,10)	30	248,05	26,99	3,56
<b>A-2</b>	N(100,10)	30	331,17	18,57	2,91
<b>A-3</b>	N(100,10)	30	314,08	22,59	4,11
<b>A-4</b>	N(100,10)	90	230,48	25,38	4,67
<b>A-5</b>	N(100,10)	90	222,96	27,86	2,14
<b>A-6</b>	N(100,10)	90	209,87	15,99	3,08
<b>A-7</b>	N(100,1)	30	2305,30	22,13	9,17
<b>A-8</b>	N(100,1)	30	1705,08	22,00	5,14
<b>A-9</b>	N(100,1)	30	1866,49	25,79	8,30
<b>A-10</b>	N(100,1)	90	1994,37	25,77	3,67
<b>A-11</b>	N(100,1)	90	1734,57	22,66	2,87
<b>A-12</b>	N(100,1)	90	1750,67	26,88	9,16
<b>A-13</b>	P(100)	30	136,89	17,47	2,15
<b>A-14</b>	P(100)	30	308,45	24,61	5,98
<b>A-15</b>	P(100)	30	198,99	14,95	3,85
<b>A-16</b>	P(100)	90	215,37	26,65	6,38
<b>A-17</b>	P(100)	90	267,79	20,82	1,99
<b>A-18</b>	P(100)	90	261,21	23,11	2,07
<b>A-19</b>	Expo(100)	30	9078	6,70	1,59
<b>A-20</b>	Expo(100)	30	42,90	6,34	3,88
<b>A-21</b>	Expo(100)	30	81,15	7,22	2,40
<b>A-22</b>	Expo(100)	90	48,87	5,75	1,85
<b>A-23</b>	Expo(100)	90	62,36	6,34	1,51
<b>A-24</b>	Expo(100)	90	77,12	7,47	1,17

*Tabla 6.1. Resultados de las pruebas con demandas aleatorias (Fuente: Elaboración Propia).*

En estas circunstancias, los resultados mostrados demuestran el deficiente rendimiento del modelo 1-1 cuando la demanda de un determinado producto se puede estimar a través de una distribución estadística, es decir, tiene un elevado componente aleatorio. Así, la aproximación de la demanda en un periodo por la demanda en el periodo anterior es una alternativa desaconsejable. Este hecho se magnifica especialmente cuando la variabilidad de la demanda del cliente es muy pequeña, alcanzando el Efecto Bullwhip valores en torno a 2000 en la distribución normal con pequeña desviación típica<sup>44</sup>.

La consideración de un método de previsión simple, como la estimación de la demanda como la media de los últimos tres periodos (es decir, una media móvil de orden 3) ya permite mejorar considerablemente los resultados. Este hecho demuestra la sentencia de Lee et al. (1997), y muchos otros autores, sobre la enorme importancia de los errores en la previsión de la demanda en la generación del Efecto Bullwhip, y justifica la

<sup>44</sup> En contra de lo que puede parecer a simple vista, el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro en casos con alta aleatoriedad, tiende, tal y como se ve, a ser mayor cuanto menor es la variabilidad de la demanda del consumidor. Lógicamente, en este caso también serán menores las varianzas en los pedidos a lo largo de la cadena de suministro, pero la variación será menor en términos relativos, generándose un mayor Efecto Bullwhip en global, de acuerdo a la *ecuación 1* (apartado 2.4).

importancia de la utilización de métodos más avanzados de previsión en la optimización de la gestión de la cadena de suministro.

Aunque se mejora el resultado, el Efecto Bullwhip que se genera con la utilización de la media móvil sigue siendo muy elevado. Surge en estos casos, consecuentemente, la necesidad de utilizar otros métodos de previsión y un sistema basado en agentes inteligentes es, a la vista de los datos, una forma adecuada de coordinarlos.

El modelo desarrollado demuestra que la combinación de técnicas simples como medias móviles y alisados exponenciales, tratando de minimizar el error cuadrático medio de las previsiones, permite alcanzar grandes resultados en la reducción del Efecto Bullwhip, mejorando de forma significativa el rendimiento ofrecido por la media móvil. En todas las pruebas, se alcanza un Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro menor que 10. El modelo determina, en consecuencia con lo visto anteriormente, que las mejores soluciones son ofrecidas por alisados exponenciales con coeficientes muy bajos y tiende a seleccionar medias móviles con un alto número de periodos, con el objetivo de minimizar el efecto de las últimas demandas en la previsión.

Por último, es posible mencionar que la gran variabilidad de los datos que se observan en la *tabla 6.1* resta importancia al tamaño de la muestra, siempre y cuando ésta alcance un número de datos significativos. Además, no se existe una relación de proporcionalidad clara entre el resultado ofrecido por el sistema multiagente (EB3) y los otros dos resultados (EB1 y EB2), sino que la mejora ofrecida depende de cada caso en particular.

A modo de ejemplo, se ilustra con más detalle el resultado de la prueba A-1. La *figura 6.1* recoge la demanda del consumidor en la misma, obtenida por el propio entorno programable utilizado, a partir de una distribución normal de media 100 y desviación típica 10. La *figura 6.2* muestra las variaciones de las órdenes de pedido realizadas por los cuatro niveles de la cadena de suministro en la misma, cuando todos utilizan el método 1-1 de previsión. La *figura 6.3* proporciona la misma información, pero con una media móvil de orden 3. Y la *figura 6.4* también representa las diferentes demandas a lo largo de la cadena de suministro, pero con la solución ofrecida por el sistema multiagente. Basta con comparar la escala de los gráficos para evaluar la idoneidad de cada alternativa en comparación con el resto. La *tabla 6.2* recoge, proporcionado por el sistema multiagente, el método de previsión óptimo para cada nivel de la cadena.

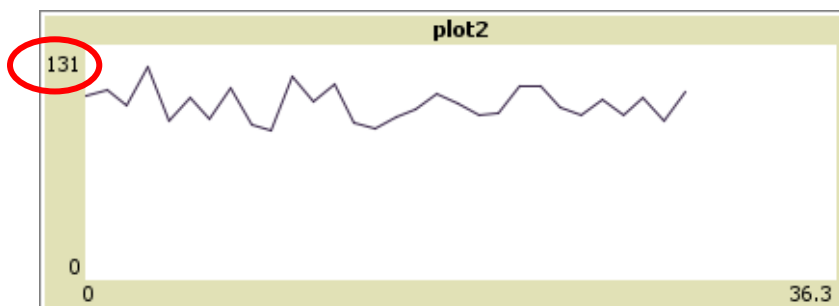


Figura 6.1. Distribución de la demanda del consumidor en el test A-1 (Fuente: Elaboración Propia).

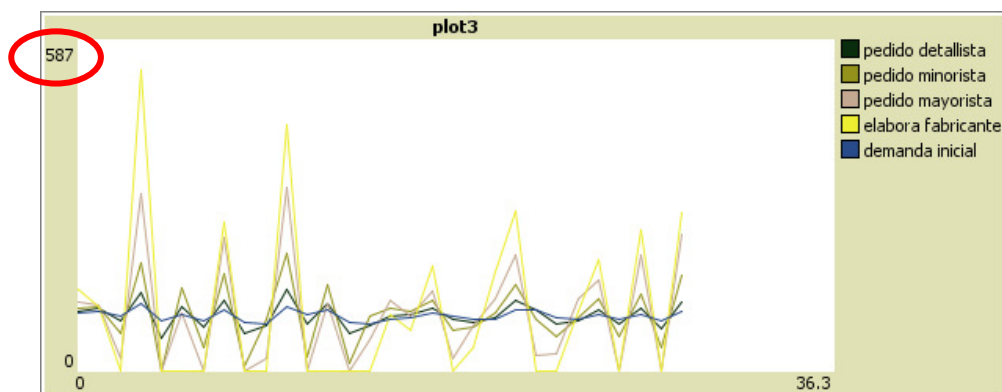


Figura 6.2. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos el método 1-1 de previsión, en el test A-1 (Fuente: Elaboración Propia).

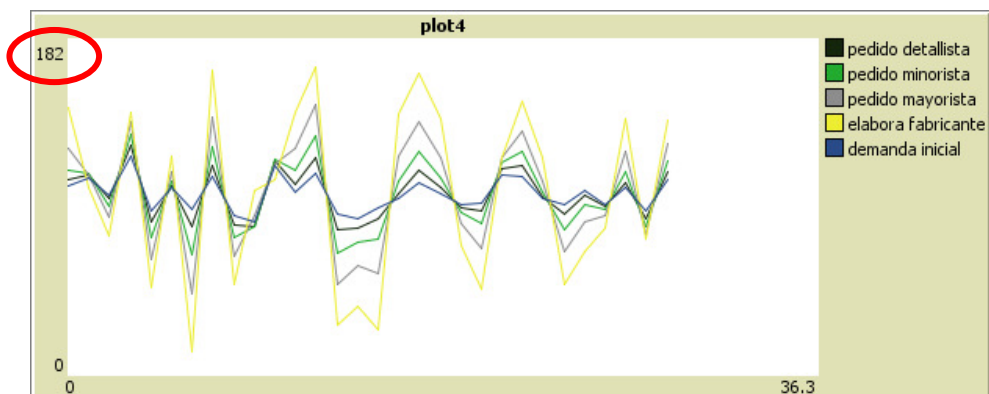


Figura 6.3. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos una media móvil de orden 3, en el test A-1 (Fuente: Elaboración Propia).

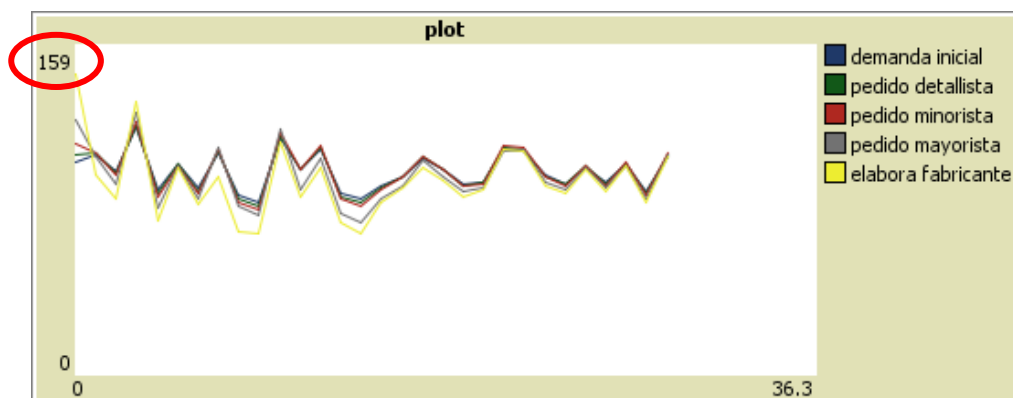


Figura 6.4. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, de la solución ofrecida por el sistema multiagente, en el test A-1 (Fuente: Elaboración Propia).

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Alisado Exponencial con $\alpha = 0,1$
Minorista	Alisado Exponencial con $\alpha = 0,1$
Mayorista	Media Móvil con $N = 11$
Fábrica	Media Móvil con $N = 7$

Tabla 6.2. Método óptimo de previsión para cada nivel en el test A-1 (Fuente: Elaboración Propia).

### 6.3. Pruebas con Demandas Reales.

Para continuar con el análisis, se detallan algunas pruebas realizadas con datos reales sobre el modelo multiagente desarrollado. Se han escogido ocho series temporales de bases de datos típicamente utilizadas en modelos de previsión, como las de Abraham y Ledolter (1983) y Box y Jenkins (1970). Además, se han seleccionado algunos datos de una extensa serie temporal con los precios y consumos horarios de electricidad en España entre enero de 1998 y octubre de 1999, obtenidos de Pino (2000). La *tabla 6.3* muestra, para cada serie, el nombre de la misma, la base datos que la contiene, la información que almacena y el número de datos que la conforman.

Test	Base de Datos	Nombre	Datos	Contenido
B-1	Abraham – L. (1983)	AL03	106	Consumo electricidad
B-2	Abraham – L. (1983)	AL04	108	Venta de coches
B-3	Abraham – L. (1983)	AL09	159	Diferencia hipotecas - préstamos
B-4	Abraham – L. (1983)	AL11	106	Consumos de gas
B-5	Box – Jenkins (1970)	BJ02	369	Precio de la acción de IBM
B-6	Box – Jenkins (1970)	BJ06	100	Manchas solares de Wolfer
B-7	Box – Jenkins (1970)	BJ08	144	Viajeros de líneas aéreas
B-8	Box – Jenkins (1970)	BJ15	150	Ventas en un almacén
B-9	Pino (2000)	EL1	150	Consumo Electricidad (Sábados)
B-10	Pino (2000)	EL2	120	Consumo Electricidad (01:00 h.)
B-11	Pino (2000)	EL3	80	Consumo Electricidad (Miérc., 00h)
B-12	Pino (2000)	EL4	150	Consumo Electricidad (Lunes)

Tabla 6.3. Series temporales utilizadas para probar el modelo multiagente (Fuente: Elaboración Propia).

La *tabla 6.4* presenta los resultados de las doce pruebas, donde las columnas contienen los siguientes valores: el número de la prueba (Test); el nombre de la serie temporal utilizada (Nombre); el tamaño de la serie (Datos); el Efecto Bullwhip generado en caso de que todos los niveles utilicen el modelo 1-1 de previsión de la demanda (EB1); el Efecto Bullwhip generado en caso de que todos los niveles utilicen una media móvil de tres periodos para la previsión de la demanda (EB2); y el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro con el modelo multiagente desarrollado (EB3). En este caso,

considera que el inventario inicial en todos los niveles de la cadena coincide con la demanda del primer periodo.

<i>Test</i>	<i>Nombre</i>	<i>Datos</i>	<i>EB1</i>	<i>EB2</i>	<i>EB3</i>
<b>B-1</b>	AL03	106	65,90	26,29	1,54
<b>B-2</b>	AL04	108	48,70	12,41	1,32
<b>B-3</b>	AL09	159	29,93	4,16	3,29
<b>B-4</b>	AL11	106	13,74	7,42	6,00
<b>B-5</b>	BJ02	369	4,20	1,21	1,12
<b>B-6</b>	BJ06	100	15,41	7,54	4,18
<b>B-7</b>	BJ08	144	12,28	3,31	1,25
<b>B-8</b>	BJ15	150	2,75	1,27	1,13
<b>B-9</b>	EL1	150	26,56	8,72	5,84
<b>B-10</b>	EL2	120	182,32	12,91	1,84
<b>B-11</b>	EL3	80	13,80	2,77	2,64
<b>B-12</b>	EL4	150	10,38	6,68	5,58

*Tabla 6.4. Resultados de las pruebas con demandas reales (Fuente: Elaboración Propia).*

Los resultados expuestos vuelven a evidenciar que el rendimiento ofrecido por el método de previsión 1-1 es muy pobre, contribuyendo de forma decisiva a la generación del Efecto Bullwhip en la cadena de suministro. Por lo tanto, vuelve a ser una alternativa desaconsejable. Sin embargo, también es preciso señalar que los resultados que ofrece son mejores que en el caso de las demandas aleatorias, lo cual permite concluir que sus resultados son peores cuanto mayor sea el grado de incertidumbre en el modelo<sup>45</sup>.

Los resultados visibles en la *tabla 6.4* vuelven a demostrar la eficacia del modelo multiagente, desarrollado e implementado, en la reducción del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro. En todos los casos, los resultados mejoran significativamente los obtenidos con el método de previsión 1-1. Respecto a la media móvil de tres periodos, ésta es suficiente para alcanzar unos resultados próximos a los del modelo multiagente en algunos casos, si bien dista bastante en otros.

De esta forma, esta situación vuelve a evidenciar que el uso de métodos de previsión simples como la media móvil o el alisado exponencial coordinados mediante un sistema multiagente permite una gran disminución del Efecto Bullwhip. Tampoco existe una relación de proporcionalidad clara entre el resultado ofrecido por el sistema multiagente y los otros dos resultados, lo cual vuelve a indicar que lo adecuado que es uno u otro

<sup>45</sup> Esta conclusión es fácilmente comprensible. El método de previsión 1-1 es aplicable, aunque ya se ha visto que hay alternativas considerablemente mejores, cuando la demanda sigue algún tipo de tendencia, pero cuando la componente aleatoria de la misma es elevada genera grandes errores en la previsión.



método de previsión depende de las características de la serie temporal a analizar. De hecho, se puede ver como en algunos casos, por ejemplo en la serie AL03, la mejora es espectacular, mientras que en otros, como en la serie AL11, la reducción lograda presenta un nivel inferior. La justificación de los resultados estaría en la tendencia y la periodicidad de cada serie temporal. A continuación veremos con más detalle, los resultados de estas dos series y trataremos de justificarlos.

De la serie AL03, representada en la *figura 6.5*, se recogen las variaciones de las demandas a lo largo de la cadena de suministro representados en la *figura 6.6*, para el método 1-1 de previsión, en la *figura 6.7*, para la media móvil de tres periodos, y en la *figura 6.8*, para el modelo multiagente desarrollado. Se observa con facilidad la elevada eficacia del modelo en la reducción de la variabilidad de los pedidos generados a lo largo de la cadena de suministro. El resultado óptimo se alcanza, según se puede ver en la *tabla 6.5* si todos los niveles utilizan una media móvil de orden 13 para la previsión de sus demandas.

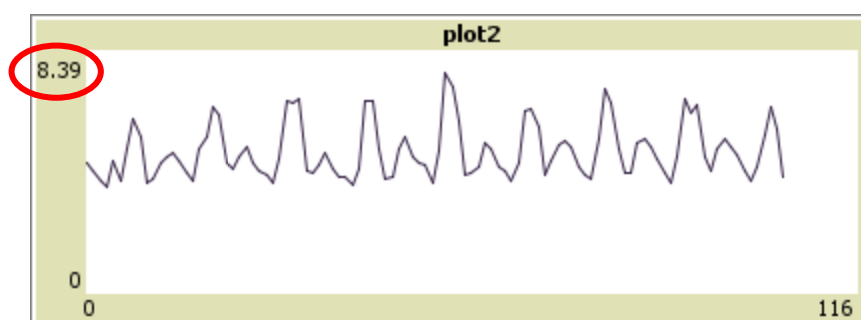


Figura 6.5. Distribución de la demanda según la serie AL03 (Fuente: Elaboración Propia).

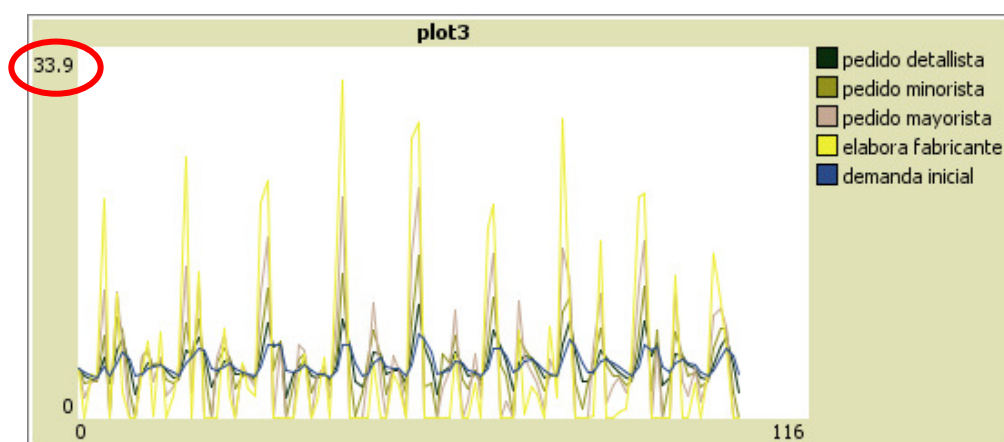


Figura 6.6. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos el método 1-1 de previsión, en la serie AL03 (Fuente: Elaboración Propia).

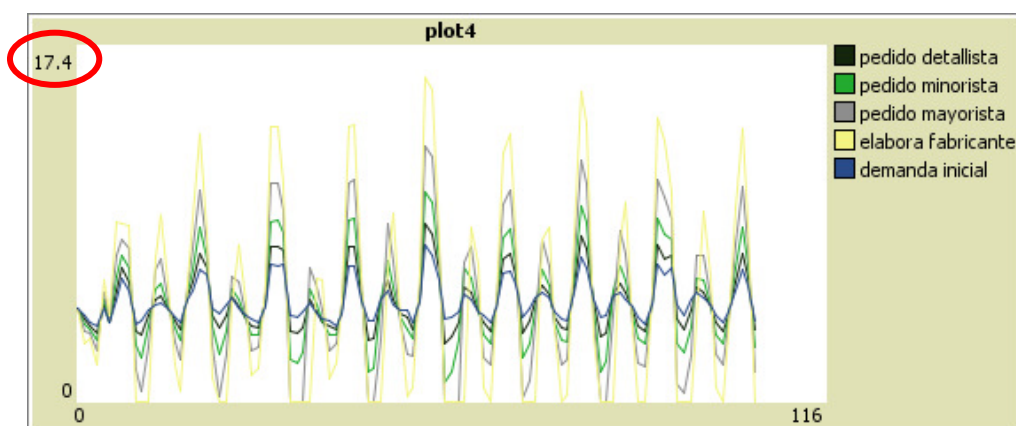


Figura 6.7. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos una media móvil de orden 3, en la serie AL03 (Fuente: Elaboración Propia).

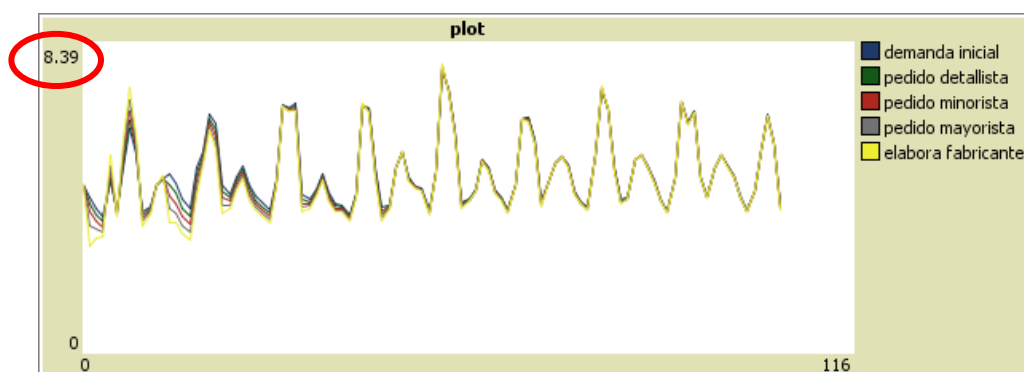


Figura 6.8. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, de la solución ofrecida por el sistema multiagente, en la serie AL03 (Fuente: Elaboración Propia).

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Media Móvil con $N = 13$
Minorista	Media Móvil con $N = 13$
Mayorista	Media Móvil con $N = 13$
Fábrica	Media Móvil con $N = 13$

Tabla 6.5. Método óptimo de previsión para cada nivel en la serie AL03 (Fuente: Elaboración Propia).

Una situación distinta es la de la serie temporal AL11, representada en la figura 6.9. De ella, se obtienen las variaciones de los pedidos transmitidos a lo largo de la cadena de suministro representados en la figura 6.10, para el método 1-1 de previsión, en la figura 6.11, para la media móvil de tres periodos, y en la figura 6.12, para el modelo multiagente desarrollado. Se puede observar que la variabilidad de las demandas disminuye en el modelo multiagente respecto a los otros dos, pero los resultados no alcanzan el nivel de la anteriormente analizada serie AL03. Con estos datos, el sistema multiagente no es capaz de lograr una mejora tan amplia en los resultados, dado el fuerte carácter estacional de la serie. La tabla 6.6 recoge el método de previsión óptimo para cada nivel.

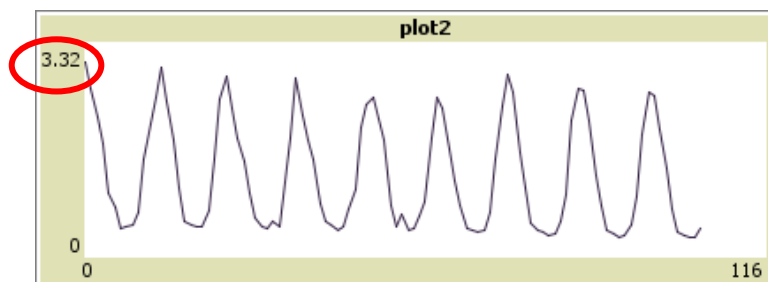


Figura 6.9. Distribución de la demanda según la serie AL11 (Fuente: Elaboración Propia).

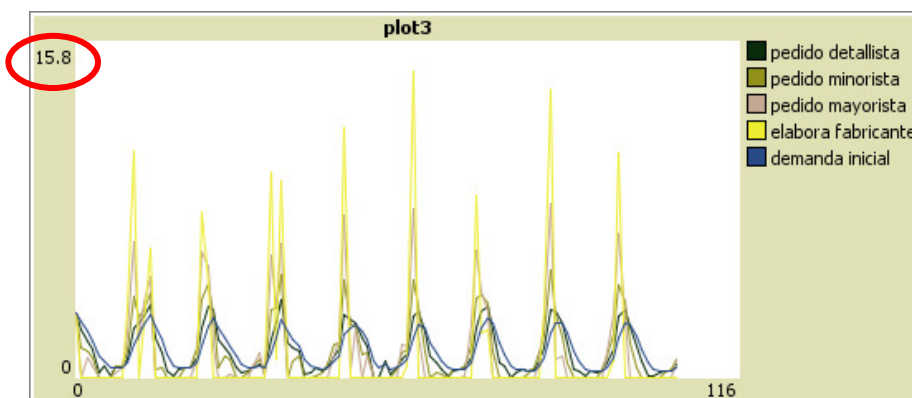


Figura 6.10. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos el método 1-1 de previsión, en la serie AL11 (Fuente: Elaboración Propia).

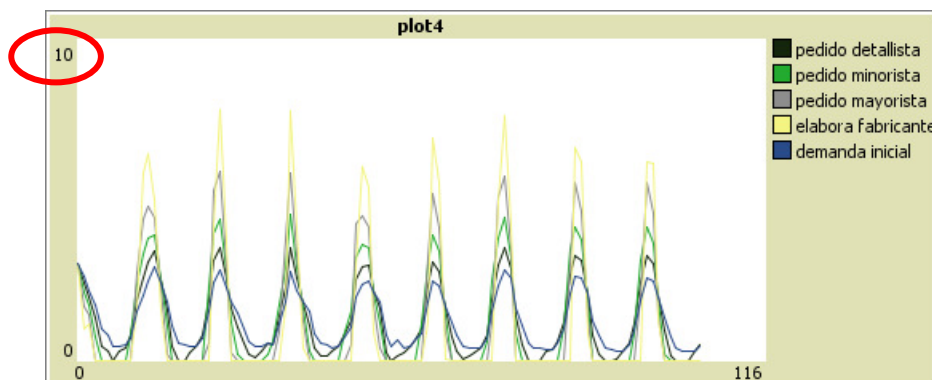


Figura 6.11. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, cuando se utiliza en todos los casos una media móvil de orden 3, en la serie AL11 (Fuente: Elaboración Propia).

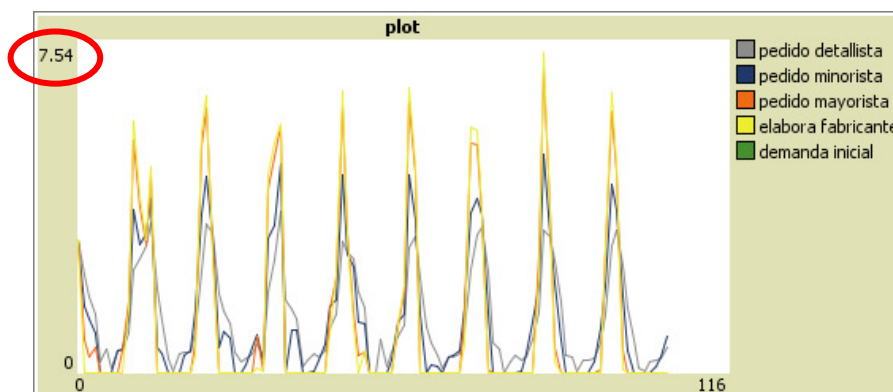


Figura 6.12. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, de la solución ofrecida por el sistema multiagente, en la serie AL11 (Fuente: Elaboración Propia).

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Política 1-1
Minorista	Alisado Exponencial con $\alpha = 0,9$
Mayorista	Media Móvil con $N = 2$
Fábrica	Media Móvil con $N = 14$

Tabla 6.6. Método óptimo de previsión para cada nivel en la serie AL11 (Fuente: Elaboración Propia).

## 6.4. Aplicación de Métodos Avanzados de Previsión.

Para finalizar este análisis, una vez demostrada la eficacia del modelo multiagente desarrollado, nos planteamos la introducción de métodos más avanzados de previsión de demanda, como puede ser el modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA). El objetivo será valorar el grado en que estas técnicas pueden ayudar a disminuir el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro, valorando si merece la pena su inclusión futura en el modelo multiagente desarrollado. Utilizaremos, entonces, las ocho series temporales de Box y Jenkins y Abraham y Ledolter que utilizamos en el apartado 6.3, pero considerando que, en este caso, la primera etapa de la cadena de suministro (es decir, el Detallista) realiza la previsión de la demanda según técnicas ARIMA<sup>46</sup>.

El modelo ARIMA –introduciendo la estacionalidad– se define mediante:

$$(p, d, q)(P, D, Q)_n$$

En esta expresión,  $p$  ( $P$ ) es el orden de la autorregresión,  $d$  ( $D$ ) es el orden de la diferenciación y  $q$  ( $Q$ ) es el orden de la media móvil. Los parámetros en minúscula son los componentes no estacionales, mientras que los parámetros en mayúsculas hacen referencia a las componentes estacionales, siendo  $n$  el orden de la estacionalidad.

Para llevar a cabo el análisis, utilizamos IBM SPSS Statistics 19. Este software dispone de la herramienta “Modelizador experto de series temporales”, que determina, en base a los datos disponibles, el modelo ARIMA que mejor se ajusta a cada serie temporal. La *tabla 6.7*, que puede considerarse una ampliación de la *tabla 6.3*, contiene el modelo

<sup>46</sup> Las técnicas ARIMA, propuestas originariamente por Box y Jenkins (1970) pueden considerarse una evolución de las técnicas simples de previsión de series temporales. Los autores desarrollaron un cuerpo metodológico destinado a identificar, estimar y diagnosticar modelos dinámicos de series temporales en los que la variable tiempo juega un papel fundamental. Están orientadas a libertar al investigador de la tarea de especificación de los modelos, dejando que los propios datos temporales de la variable a estudiar, indiquen las características de la estructura probabilística subyacente. Supusieron, así, una enorme revolución frente a otras técnicas utilizadas hasta la fecha.

ARIMA propuesto por la citada herramienta para cada una de las series temporales a utilizar.

<i>Test</i>	<i>Base de Datos</i>	<i>Nombre</i>	<i>Datos</i>	<i>Modelo ARIMA</i>
<b>C-1</b>	Abraham (1983)	AL03	106	(0,0,1)(0,1,1) <sub>12</sub>
<b>C-2</b>	Abraham (1983)	AL04	108	(2,0,0)(0,1,0) <sub>12</sub>
<b>C-3</b>	Abraham (1983)	AL09	159	(1,0,0)
<b>C-4</b>	Abraham (1983)	AL11	106	(1,0,0)(0,1,1) <sub>12</sub>
<b>C-5</b>	Box – Jenkins (1976)	BJ02	369	(0,1,0)
<b>C-6</b>	Box – Jenkins (1976)	BJ06	100	(0,0,2)(1,0,0) <sub>11</sub>
<b>C-7</b>	Box – Jenkins (1976)	BJ08	144	(0,1,1)(0,1,1) <sub>12</sub>
<b>C-8</b>	Box – Jenkins (1976)	BJ15	150	(1,1,1)

*Tabla 6.7. Modelos ARIMA de las series temporales utilizadas (Fuente: Elaboración Propia).*

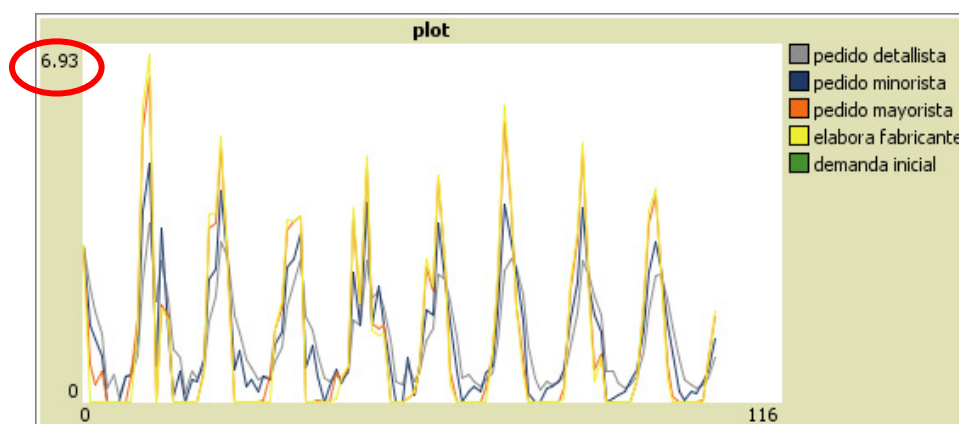
La *tabla 6.8*, que surge de la *tabla 6.4*, compara el Efecto Bullwhip que se genera en la cadena de suministro para las distintas series temporales con el modelo multiagente desarrollado (EB2, según la notación en la citada *tabla 8.4*) con el resultado que alcanzaría el mismo sistema multiagente, utilizando modelos ARIMA en la previsión de la demanda del consumidor (EB4). Además, se añade una última columna con la disminución, en términos porcentuales, alcanzada en cada caso.

<i>Test</i>	<i>Nombre</i>	<i>Datos</i>	<i>EB3</i>	<i>EB4</i>	<i>Reducción</i>
<b>C-1</b>	AL03	106	1,54	1,52	1,30%
<b>C-2</b>	AL04	108	1,32	1,28	3,03%
<b>C-3</b>	AL09	159	3,29	2,54	22,80%
<b>C-4</b>	AL11	106	6,00	3,89	35,17%
<b>C-5</b>	BJ02	369	1,12	1,11	0,89%
<b>C-6</b>	BJ06	100	4,18	3,45	17,46%
<b>C-7</b>	BJ08	144	1,25	1,23	1,60%
<b>C-8</b>	BJ15	150	1,13	1,12	0,88%

*Tabla 6.8. Resultados de las pruebas con demandas reales utilizando técnicas ARIMA en el nivel de la cadena de suministro más próximo al cliente (Fuente: Elaboración Propia).*

Los resultados recogidos demuestran que el uso de métodos de previsión más avanzados lleva a la reducción del Efecto Bullwhip generado a lo largo de la misma. Así, la inclusión de los modelos de previsión ARIMA en el nivel más cercano al cliente ofrece resultados muy interesantes, y permite reducir aún más el Efecto Bullwhip generado a lo largo de la cadena de suministro. Aún así, como se puede ver en la *tabla 6.8*, la reducción es más significativa en algunos casos que en otros. En estas circunstancias, resulta interesante plantearse incorporación al modelo multiagente, como posible mejora futura del mismo, a través de un nuevo agente dentro de los Agentes de Previsión.

La *figura 6.13* representa, a modo de ejemplo, el resultado que proporciona el modelo multiagente en la serie AL11 al utilizar las técnicas ARIMA, en la que la reducción alcanzada del Efecto Bullwhip supera el 35%. Al compararla con la *figura 6.12*, que ofrece la misma información pero sin la inclusión de las técnicas ARIMA, se puede observar cómo disminuye considerablemente la variabilidad de los pedidos a lo largo de la cadena de suministro. La *tabla 6.7* recoge la política de pedido de cada nivel en este caso.



*Figura 6.13. Variaciones de las distintas demandas a lo largo de la cadena de suministro, de la solución ofrecida por el sistema multiagente, en la serie AL11, utilizando la metodología ARIMA en el nivel del Detallista (Fuente: Elaboración Propia).*

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Modelo ARIMA (1,0,0)(0,1,1) <sub>12</sub>
Minorista	Alisado Exponencial con $\alpha = 0,9$
Mayorista	Media Móvil con $N = 2$
Fábrica	Media Móvil con $N = 14$

*Tabla 6.7. Método óptimo de previsión para cada nivel en la serie AL1, utilizando la metodología ARIMA en el nivel del Detallista 1 (Fuente: Elaboración Propia).*

## 6.5. Conclusiones.

La principal conclusión que se deriva del estudio realizado en este apartado es la enorme importancia de las previsiones de la demanda en la generación del Efecto Bullwhip a lo largo de la cadena de suministro.

Las pruebas realizadas sobre los datos de partida evidencian que el método 1-1 de amplifica enormemente la variabilidad del pedido del consumidor final a lo largo de la cadena de suministro, especialmente cuando las demandas tienen un elevado grado de aleatoriedad. Hemos analizado con aplicaciones reales la enorme disminución que se

puede lograr del mismo, optimizando la gestión de la cadena de suministro, a través de la combinación de técnicas simples de previsión.

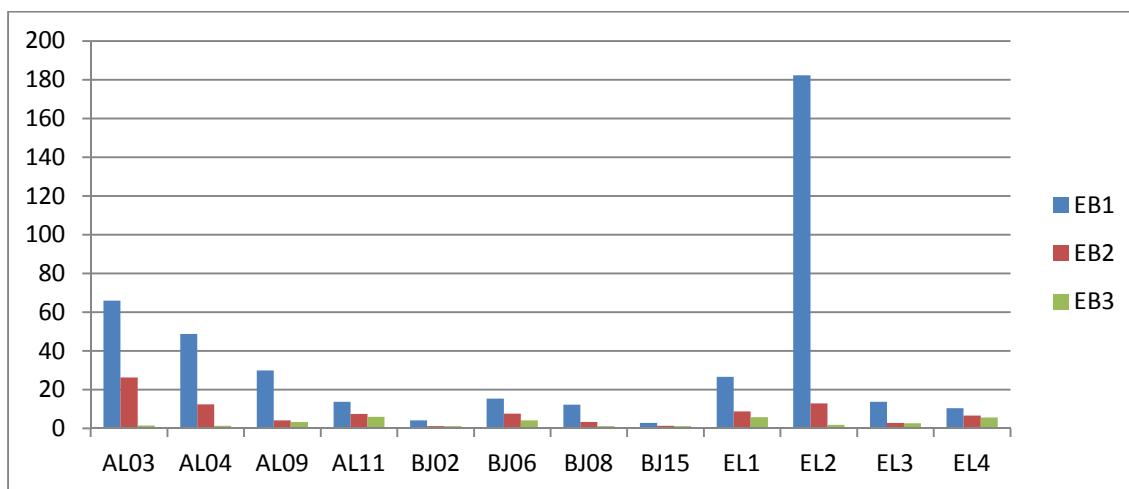


Figura 6.14. Mejora de los resultados ofrecida por el sistema multiagente en los casos reales analizados (Fuente: Elaboración Propia).

En este contexto, la aplicación del modelo multiagente permite disminuir considerablemente el Efecto Bullwhip generado, alcanzando una gran eficacia en este objetivo. Aún así, hemos visto que la tendencia y la estacionalidad de la serie condiciona en gran medida el resultado de la herramienta desarrollada, aunque en todos los casos se mejora considerablemente el rendimiento del método 1-1, tal y como se representa en la figura 6.14.

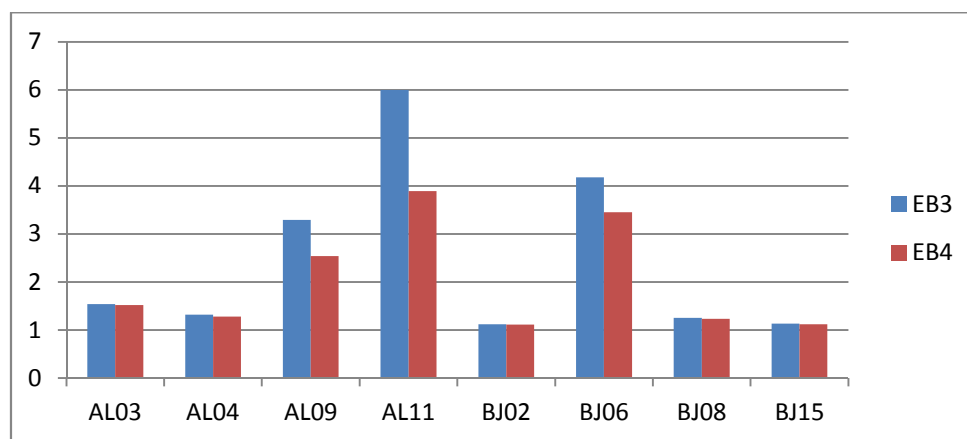


Figura 6.15. Mejora de los resultados al utilizar técnicas ARIMA en el nivel del Detallista (Fuente: Elaboración Propia).

Para desarrollar la herramienta, se han considerado exclusivamente métodos de previsión simples, como medias móviles y alisados exponenciales, de forma que cada nivel de la cadena utilice el que mejor se adapte a la demanda que debe atender. Con ellos, se alcanzan grandes resultados en la reducción del Efecto Bullwhip. Aún así,

también se ha demostrado que la inclusión de métodos de previsión más avanzados (modelos ARIMA) permiten obtener aún un mejor rendimiento del sistema, planteándonos su futura incorporación al modelo a través de un nuevo Agente de Previsión. La *figura 6.15* recoge la disminución en el Efecto Bullwhip lograda al considerar técnicas ARIMA en el nivel de la cadena de suministro más próximo al cliente.



## 7. APLICACIÓN NUMÉRICA (II): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS COSTES DE ROTURA DE STOCK

### 7.1. Presentación del Estudio.

Como vimos en el apartado 2.4, algunos autores defienden que la medida del Efecto Bullwhip como la amplificación de la varianza a lo largo de la cadena de suministro, de acuerdo a la *ecuación 2* (apartado 2.4) y a la *ecuación 3* (apartado 2.4), es insuficiente. Argumentan que han de tenerse, además, en cuenta los efectos de las distintas políticas de pedido sobre los inventarios de los distintos niveles de la cadena de suministro<sup>47</sup>, por ejemplo a través de la *ecuación 4* (apartado 2.4). Otra forma de considerar este hecho es directamente a través de los costes de almacenamiento y de rotura de stock, que es la forma en que lo hemos incluido en nuestro modelo, tal y como se explica con detalle en el apartado 5.2.5.

Por otro lado, Lee et al. (1997) defienden, según se ha detallado en el apartado 3.5, que el miedo a la rotura de stock motiva decisiones de los distintos participantes de la cadena de suministro que transmiten información errónea a la misma, siendo ésta otra de las causas principales en la generación del Efecto Bullwhip.

En este contexto, dedicaremos este apartado a analizar el efecto de los costes de almacenamiento y, especialmente, de los costes de rotura de stock sobre el Efecto Bullwhip. Para ello, activaremos el módulo relacionado con estos costes en el modelo desarrollado, que no habíamos considerado en el apartado anterior. Así, estamos tratando de aproximar más el modelo a la realidad, eliminando la hipótesis expuesta en el apartado 5.3.2, según la cual los clientes eran infinitamente pacientes y leales a la

---

<sup>47</sup> Este hecho se ilustra con claridad a través de un sencillo ejemplo. Suponemos que un determinado nivel de la cadena de suministro lleva a cabo una política de pedido constante y periódico. Es decir, que en cada periodo pide la misma cantidad, estimada como la media de la demanda que espera recibir en un número mayor de periodos. Por la propia definición (*ecuación 2*), el Efecto Bullwhip generado en ese nivel sería nulo, ya que la varianza de los pedidos transmitidos al siguiente nivel es nulo. Sin embargo, esa política tiende a desembocar en desajustes enormes en su situación de inventario, especialmente si las previsiones realizadas no se ajustan a la demanda recibida posteriormente, generándose muchos de los problemas asociados al Efecto Bullwhip comentados en el apartado 2.5.

cadena de suministro, unas condiciones en las cuales no tendría sentido hablar de costes de rotura de stock.

De esta forma, valoraremos, en primer lugar, la solución ofrecida por el modelo multiagente si el algoritmo desarrollado para el Agente de Evaluación busca la solución óptima únicamente basándose en el criterio de costes. A continuación, repetiremos el cálculo con la consideración simultánea de ambos criterios. En ambos casos, compararemos los resultados con las soluciones obtenidas en el apartado anterior.

## 7.2. Consideración Exclusiva de la Optimización de Costes.

Para comenzar el análisis, se detallan algunas pruebas realizadas sobre las mismas series temporales utilizadas en el apartado 6.3 sobre el modelo multiagente, activando el módulo relacionado con los costes de almacenamiento y costes de rotura, de forma que el Agente de Evaluación solo tenga en cuenta este criterio. De esta forma, según la *ecuación 19* (apartado 5.2.5), se asigna el peso máximo al criterio relacionado con los costes de gestión ( $P_{EBS} = 100$ ) y el peso mínimo al criterio relacionado con la amplificación de las demandas ( $P_{EBD} = 0$ ), resultando la *ecuación 19a*.

$$Valoración(i) = 100 \cdot \frac{CT_{EB}^n(min)}{CT_{EB}^n(i)} \quad [Ec. 19a]$$

<i>Test</i>	<i>Nombre</i>	<i>Datos</i>	<i>EB3</i>	<i>EB5</i>	<i>EB6</i>	<i>EB7</i>
<b>D-1</b>	AL03	106	1,54	4,20	4,20	4,20
<b>D-2</b>	AL04	108	1,32	2,85	8,32	48,70
<b>D-3</b>	AL09	159	3,29	3,94	3,94	3,94
<b>D-4</b>	AL11	106	6,00	6,47	6,47	13,74
<b>D-5</b>	BJ02	369	1,12	1,16	1,16	1,16
<b>D-6</b>	BJ06	100	4,18	4,22	7,07	15,41
<b>D-7</b>	BJ08	144	1,25	1,29	1,96	1,96
<b>D-8</b>	BJ15	150	1,13	1,15	1,15	1,15
<b>D-9</b>	EL01	150	5,84	6,68	6,68	6,68
<b>D-10</b>	EL02	120	1,84	1,84	1,84	1,84
<b>D-11</b>	EL03	80	2,64	2,64	3,09	4,55
<b>D-12</b>	EL04	150	5,58	6,55	6,55	6,55

*Tabla 7.1. Resultados de las pruebas con la consideración exclusiva del criterio de optimización de costes (Fuente: Elaboración Propia).*

La *tabla 7.1* presenta los resultados de las pruebas realizadas, donde las columnas contienen los siguientes valores: el número de la prueba (Test); el nombre de la serie

temporal utilizada (Nombre); el tamaño de la serie (Datos); y el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro con el modelo multiagente desarrollado:

- sin considerar el módulo de costes –obtenido de la *tabla 6.1*– (EB3),
- considerando el módulo de costes con una relación de 1, es decir,  
 $CT_{rot}^n = CT_{alm}^n$  (EB5),
- considerando el módulo de costes con una relación de 4, es decir,  
 $CT_{rot}^n = 4 CT_{alm}^n$  (EB6),
- considerando el módulo de costes con una relación de 10, es decir,  
 $CT_{rot}^n = 10 CT_{alm}^n$  (EB7).

En la citada tabla, se puede ver que cuanto mayor es la importancia de los costes de rotura de stock respecto a los costes de almacenamiento –es decir, cuánto mayor es riesgo en los distintos participantes de la cadena a la rotura de stock–, mayor tiende a ser el Efecto Bullwhip generado por el modelo multiagente en la búsqueda de la solución óptima.

En estas circunstancias, los resultados expuestos evidencian que los costes de rotura de stock contribuyen a la generación del Efecto Bullwhip. Estos costes motivan decisiones entre los distintos miembros de la cadena de suministro que, a la vista de los datos, tienden a incrementar la variabilidad de las demandas transmitidas a lo largo de la misma. A su vez, el Efecto Bullwhip, como se analizó en el apartado 2.3, aumenta el riesgo de rotura de stock, introduciéndose la cadena de suministro en un bucle que complica de forma considerable su gestión, y en el cuál un modelo multiagente es una forma adecuada para plantear y resolver el problema.

Recalcamos que se ha utilizado el verbo “tender a”, para señalar que no hay ningún tipo de relación matemática directa entre ambas variables, sino que los resultados obtenidos por cada serie temporal dependen de las características particulares de la misma. Es decir, se puede ver como, por ejemplo, en la prueba D-8, correspondiente a la serie BJ15, el Efecto Bullwhip apenas aumenta, por mucho que aumente la importancia de los costes de rotura. Sin embargo, en la prueba D-2, relacionada con la serie temporal AL04, la consideración de los costes de rotura desemboca en un aumento enorme del Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro. Analizando estos casos extremos, en busca de un porqué, se presentan la *tabla 7.2* y la *tabla 7.3*.

La *tabla 7.2* detalla los cálculos para la prueba D-2, realizada sobre la serie temporal AL04, representada en la figura 7.1. Para cada nivel de la cadena de suministro, se recoge el inventario medio por periodo almacenado (en unidades) al final del mismo, así como la rotura de stock media por periodo (también en unidades). También contiene información sobre el Efecto Bullwhip generado en el nivel. Por último, se recogen los valores del inventario y rotura de stock media de la cadena de suministro, como las medias aritméticas de los cuatro valores anteriores, así como el Efecto Bullwhip global, que coincide con el expresado en la *tabla 7.1*.

	<i>EB3</i>	<i>EB5</i>	<i>EB6</i>	<i>EB7</i>
<b>NIVEL DETALLISTA</b>	MM n=13	1-1	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	1,21	1,27	1,27	1,27
Rotura de Stock Media	1,79	1,34	1,34	1,34
EB nivel	1,05	2,04	2,04	2,04
<b>NIVEL MINORISTA</b>	MM n=13	MM n=13	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	1,31	2,19	2,73	2,73
Rotura de Stock Media	1,86	2,69	2,55	2,55
EB nivel	1,06	1,10	3,10	3,10
<b>NIVEL MAYORISTA</b>	MM n=13	MM n=13	MM n=13	1-1
Inventario Almacenado Medio	1,43	2,36	4,26	8,76
Rotura de Stock Media	1,95	2,81	4,54	3,89
EB nivel	1,08	1,12	1,14	3,08
<b>NIVEL FABRICANTE</b>	MM n=13	MM n=13	MM n=13	1-1
Inventario Almacenado Medio	1,56	2,55	4,68	26,90
Rotura de Stock Media	2,03	2,94	4,86	4,51
EB nivel	1,10	1,14	1,15	2,51
<b>CADENA DE SUMINISTRO</b>	-	-	-	-
Inventario Almacenado Medio	1,38	2,09	3,24	9,92
Rotura de Stock Media	1,91	2,4	3,32	3,07
EB total	1,32	2,85	8,32	48,70

*Tabla 7.2. Resultados detallados de la prueba D-2 (Fuente: Elaboración Propia).*



*Figura 7.1. Distribución de la demanda del consumidor en el test D-2 (Fuente: Elaboración Propia).*

Del análisis de la *tabla 7.2* se pueden extraer datos de gran interés en el estudio del efecto de los costes de rotura sobre el Efecto Bullwhip. No sólo se evidencia que la consideración de los costes de rotura en cada nivel tiende a amplificar enormemente el Efecto Bullwhip, sino que además, paradójicamente, también tiende a aumentar la rotura de

stock media generada en la cadena de suministro. Es decir, si cada nivel tiende a disminuir la rotura de stock de forma individual, la rotura de stock generada en la cadena de suministro aumenta. Se ve, por ejemplo, en la segunda columna (EB5). Al considerar los costes de rotura, el Detallista logra disminuir la rotura de stock utilizando una política 1-1. Sin embargo, ello produce un aumento del inventario almacenado, que distorsiona la transmisión de información a lo largo de la cadena, generándose un elevado Efecto Bullwhip, que acaba por aumentar la rotura de stock del resto de niveles.

O dicho de otra forma, la búsqueda de la solución óptima por cada miembro de la cadena no implica, como hemos visto, la solución óptima del global de la misma. Esta situación evidencia la necesidad de cooperación en la cadena en busca de la mejor solución para los miembros que la forman, pero también pone de manifiesto la dificultad para que ésta se logre: a cada participante le interesa tomar unas decisiones que no benefician al global de la cadena. Todo ello deriva del famoso equilibrio de Nash, del que hablamos en el apartado 4.3.1.

	<i>EB3</i>	<i>EB5</i>	<i>EB6</i>	<i>EB7</i>
<b>NIVEL DETALLISTA</b>	AE $\alpha = 0,9$	1-1	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	0,004	0,004	0,004	0,004
Rotura de Stock Media	0,008	0,008	0,008	0,008
EB nivel	1,01	1,01	1,01	1,01
<b>NIVEL MINORISTA</b>	MM n=2	AE $\alpha = 0,8$	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	0,007	0,008	0,009	0,009
Rotura de Stock Media	0,014	0,013	0,013	0,013
EB nivel	1,02	1,03	1,04	1,04
<b>NIVEL MAYORISTA</b>	MM n=2	AE $\alpha = 0,5$	MM n=4	MM n=4
Inventario Almacenado Medio	0,013	0,015	0,016	0,016
Rotura de Stock Media	0,020	0,023	0,027	0,027
EB nivel	1,05	1,05	1,03	1,03
<b>NIVEL FABRICANTE</b>	MM n=4	MM n=3	MM n=3	MM n=3
Inventario Almacenado Medio	0,020	0,023	0,022	0,022
Rotura de Stock Media	0,031	0,033	0,031	0,031
EB nivel	1,04	1,05	1,06	1,06
<b>CADENA DE SUMINISTRO</b>	-	-	-	-
Inventario Almacenado Medio	0,011	0,013	0,013	0,013
Rotura de Stock Media	0,018	0,019	0,020	0,020
EB total	1,13	1,15	1,15	1,15

*Tabla 7.3. Resultados detallados de la prueba D-6 (Fuente: Elaboración Propia).*

La misma idea se puede observar en la *tabla 7.3*, que detalla los cálculos para la prueba D-8, realizada sobre la serie temporal BJ15, representada en la *figura 7.2*. Sin embargo, el efecto de los costes de rotura sobre la variabilidad de las demandas en la cadena de suministro es mucho menor. La razón de este hecho está en la menor variabilidad de la demanda del consumidor, comparada con el caso anterior.

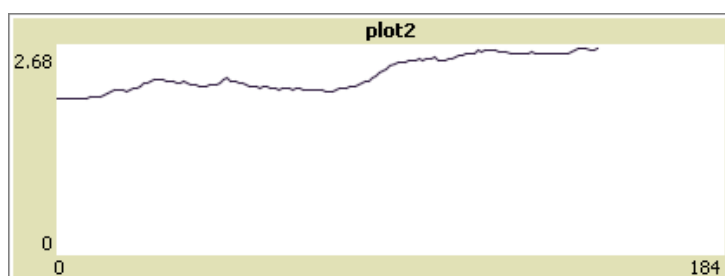


Figura 7.2. Distribución de la demanda del consumidor en el test D-8 (Fuente: Elaboración Propia).

### 7.3. Consideración Simultánea de Ambos Criterios.

El modelo desarrollado permite aproximarnos más hacia la simulación de una cadena de suministro real, a través de la selección de una relación específica entre los costes de rotura de stock y de almacenamiento distinta para nivel, así como a una ponderación de los pesos de los distintos criterios distinta para cada nivel

A modo de ejemplo, vamos a tratarnos de aproximar a la realidad, otorgando una mayor importancia a los costes de rotura en los niveles de la cadena de suministro más próximos al cliente. Por lo general, el cliente tiene más alternativas para comprar el producto que el Mayorista. De la misma forma, vamos a ponderar de mayor forma el criterio del Efecto Bullwhip a mayores niveles de la cadena de suministro, considerando que éstos tienen un mayor interés en la minimización de éste, ya que resultan los más perjudicados con su generación. Con esta misma idea, aunque con distintos valores, se han realizado tres tests. La *tabla 7.4* recoge las condiciones en que se han realizado.

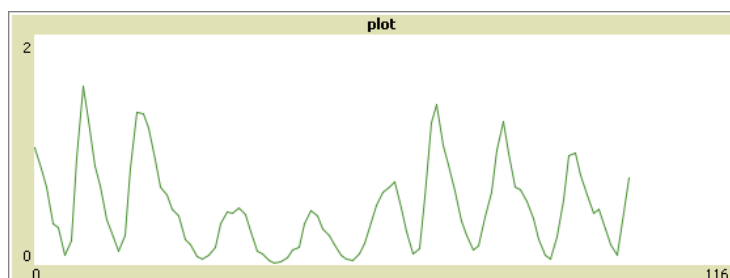
	<i>Test E-0</i>	<i>Test E-1</i>	<i>Test E-2</i>	<i>Test E-3</i>
<b>NIVEL DETALLISTA</b>				
Peso Criterio EB	100	35	20	0
Peso Criterio Costes	0	65	80	100
Relación Costes Rot. / Alm.	-	4	8	64
<b>NIVEL MINORISTA</b>				
Peso Criterio EB	100	45	40	33
Peso Criterio Costes	0	55	60	67
Relación Costes Rot. / Alm.	-	3	4	16
<b>NIVEL MAYORISTA</b>				
Peso Criterio EB	100	55	60	67
Peso Criterio Costes	0	45	40	33
Relación Costes Rot. / Alm.	-	2	2	4
<b>NIVEL FABRICANTE</b>				
Peso Criterio EB	100	65	80	100
Peso Criterio Costes	0	35	20	0
Relación Costes Rot. / Alm.	-	1	1	1

Tabla 7.4. Condiciones del módulo de costes de rotura y almacenamiento en las que se han realizado los tests E-0, E-1, E-2 y E-3 (Fuente: Elaboración Propia).

Las distintas pruebas se han llevado a cabo sobre la serie BJ06, representada en la *figura 7.3*, generan el mismo resultado, recogido en la *tabla 7.5*. Se muestran estos datos con los resultados de la prueba realizada en el apartado 6.3, considerando únicamente el criterio relacionado con el Efecto Bullwhip.

	<i>Test E-0</i>	<i>Test E-1</i>	<i>Test E-2</i>	<i>Test E-3</i>
<b>NIVEL DETALLISTA</b>	1-1	1-1	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	0,089	0,089	0,089	0,089
Rotura de Stock Media	0,081	0,081	0,081	0,081
EB nivel	1,69	1,69	1,69	1,69
<b>NIVEL MINORISTA</b>	AE $\alpha=0,9$	1-1	1-1	1-1
Inventario Almacenado Medio	0,184	0,183	0,183	0,183
Rotura de Stock Media	0,113	0,105	0,105	0,105
EB nivel	1,98	2,01	2,01	2,01
<b>NIVEL MAYORISTA</b>	MM n=12	MM n=12	MM n=12	MM n=12
Inventario Almacenado Medio	0,282	0,282	0,282	0,282
Rotura de Stock Media	0,247	0,247	0,247	0,247
EB nivel	1,14	1,15	1,15	1,15
<b>NIVEL FABRICANTE</b>	MM n=12	MM n=12	MM n=12	MM n=12
Inventario Almacenado Medio	0,317	0,322	0,322	0,322
Rotura de Stock Media	0,255	0,256	0,256	0,256
EB nivel	1,09	1,09	1,09	1,09
<b>CADENA DE SUMINISTRO</b>				
Inventario Almacenado Medio	0,218	0,219	0,219	0,219
Rotura de Stock Media	0,174	0,172	0,172	0,172
EB total	4,18	4,22	4,22	4,22

*Tabla 7.5. Resultados detallados de las pruebas E-0, E-1, E-2 y E-3 (Fuente: Elaboración Propia).*



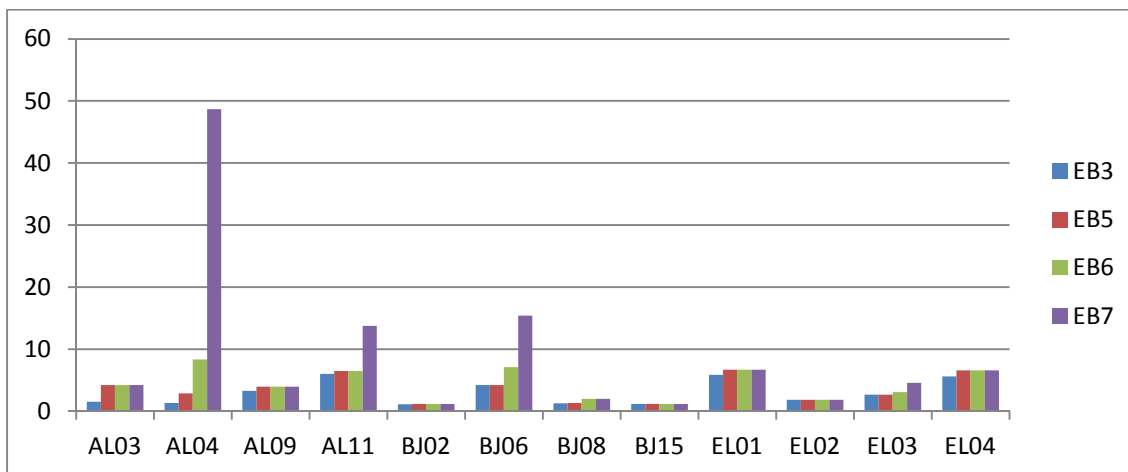
*Figura 7.3. Distribución de la demanda del consumidor en el test D-6 (Fuente: Elaboración Propia).*

## 7.4. Conclusiones.

El análisis llevado a cabo en este apartado evidencia la relación entre los costes de rotura de stock y la generación del Efecto Bullwhip en la cadena de suministro. De esta forma, confirma la hipótesis de que el miedo a la rotura de stock es una de las principales causas de la amplificación de la variabilidad de las demandas.

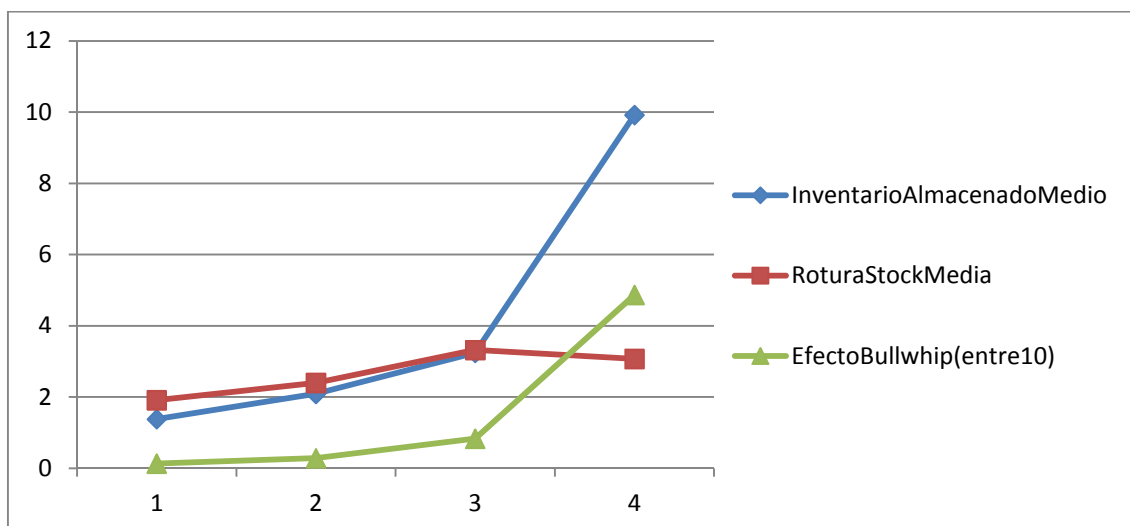
A través de diversos ejemplos, se ha visto como la consideración, por parte de distintos niveles, de los costes de rotura de stock desemboca en un aumento del Efecto Bullwhip,

que es más o menos significativa según las características de tendencia y estacionalidad de la serie. Este hecho se representa en la *figura 7.3*.



*Figura 7.4. Aumento del Efecto Bullwhip al considerar los costes de rotura, según la importancia de los mismos (Fuente: Elaboración Propia).*

Por otro lado, y, paradójicamente, se ha visto como la consideración de los costes de rotura en cada nivel de la cadena de forma individual desemboca en un aumento de la rotura de stock media en la misma. Este fenómeno se representa en la *figura 7.5*. Esto evidencia, por otro lado, que la búsqueda de la solución óptima por parte de cada agente no desemboca en la mejor solución para el global de la cadena de suministro.



*Figura 7.5. Aumento de los costes de rotura y de almacenamiento, al considerar los costes de rotura a nivel individual, en la serie AL04 (Fuente: Elaboración Propia).*



## **8. APLICACIÓN NUMÉRICA (III): ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA COOPERACIÓN ENTRE AGENTES**

### **8.1. Presentación del Estudio.**

Las soluciones tradicionales al Efecto Bullwhip se basan en la búsqueda de la disminución de la información defectuosa trasladada al mercado por parte de los distintos agentes. Así, el acceso de los distintos agentes a la demanda del mercado es una alternativa eficaz para disminuirlo. Sin embargo, son varias las barreras que obstaculizan este intercambio de información veraz, como se han explicado en el apartado 4.2.

En estas circunstancias, en este apartado analizaremos las consecuencias sobre la cadena de suministro si Detallista y Minorista, por un lado, y Mayorista y Fabricante, por otro, comparten la información disponible, elaborando una planificación conjunta para satisfacer la demanda a la que deben hacer frente. De esta forma, a efectos prácticos sería como si la cadena de suministro tan solo quedase formada por dos niveles, además del consumidor. Se valorará el grado de reducción alcanzado en el Efecto Bullwhip. Simultáneamente se estudiará el efecto de la estructura de la cadena de suministro sobre la amplificación de la variabilidad de las demandas a lo largo de la misma. Utilizaremos para ello las mismas series temporales que hemos empleado en las aplicaciones numéricas anteriores.

Para llevar a cabo este análisis, activaremos el módulo de negociación, que no habíamos considerado en los apartados anteriores, y desactivaremos el módulo relacionado con los costes de rotura de stock y de almacenamiento. Así, el módulo de negociación introduce al sistema el Agente de Negociación, que se basará exclusivamente en una negociación cooperativa<sup>48</sup> entre los niveles mencionados, buscando la mejor solución para el global

---

<sup>48</sup> La teoría moderna sobre negociación (Valls, 2006) diferencia, a grandes rasgos, dos tipos: la negociación competitiva y la negociación cooperativa. La primera se corresponde con la idea clásica de negociación, y hace referencia a una alternativa en la que los distintos participantes entra en contraposición, de forma que lo que gana uno es lo que pierde el otro. La segunda se extiende hacia la posibilidad de que ambos agentes puedan salir beneficiados simultáneamente de algunas decisiones en el proceso negociador.

de la cadena de suministro. Cabe mencionar que se trata de un módulo cuyas funcionalidades se desean aumentar en el futuro, con el objetivo de aproximar más la cadena de suministro hacia unas condiciones más cercanas a las reales, incluyendo también la negociación competitiva entre los distintos niveles.

## 8.2. Pruebas Realizadas.

La *tabla 8.1* recoge los resultados de las doce pruebas realizadas, donde las columnas contienen los siguientes valores: el número de la prueba (Test); el nombre de la serie temporal utilizada (Nombre); el tamaño de la serie (Datos); el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro con el modelo multiagente desarrollado sin activar el módulo de negociación (EB3) y activándolo (EB8); y la reducción en términos porcentuales alcanzada en cada caso (Reducción).

<i>Test</i>	<i>Nombre</i>	<i>Datos</i>	<i>EB3</i>	<i>EB8</i>	<i>Reducción</i>
<b>E-1</b>	AL03	106	1,54	1,22	20,78%
<b>E-2</b>	AL04	108	1,32	1,11	15,91%
<b>E-3</b>	AL09	159	3,29	2,61	20,67%
<b>E-4</b>	AL11	106	6,00	2,88	52,00%
<b>E-5</b>	BJ02	369	1,12	1,05	6,25%
<b>E-6</b>	BJ06	100	4,18	3,35	19,86%
<b>E-7</b>	BJ08	144	1,25	1,18	5,60%
<b>E-8</b>	BJ15	150	1,13	1,03	8,85%
<b>E-9</b>	EL01	150	5,84	2,44	58,22%
<b>E-10</b>	EL02	120	1,84	1,23	33,15%
<b>E-11</b>	EL03	80	2,64	1,31	50,38%
<b>E-12</b>	EL04	150	5,58	3,28	41,21%

*Tabla 8.1. Resultados de las pruebas activando el Agente de Negociación (Fuente: Elaboración Propia).*

La citada tabla evidencia que la activación del Agente de Negociación produce una disminución considerable –mayor en unos casos y menor en otros, pero siempre relevante– en el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro. Así, compartir información entre los distintos miembros, tratando de simplificar la estructura de la cadena de suministro, es una alternativa eficaz para optimizar la gestión de la misma, lo cual concuerda con las soluciones tradicionales al Efecto Bullwhip, expuestas en el apartado 4.2, basadas en reducir el grado de incertidumbre en la gestión.

La *figura 8.2* y la *figura 8.3* representan, a modo de ejemplo, la solución óptima encontrada por el modelo multiagente desarrollado sin activar y activando el Agente de Negociación para la serie AL09, representada en la *figura 8.1*. Las representaciones

permiten ver como la amplificación de la variabilidad de la demanda es considerablemente mayor en el primer caso que en el segundo. La *tabla 8.2*, asociada con la *figura 8.2*, y la *tabla 8.3*, asociada con la *figura 8.3*, contienen el método óptimo de previsión para los diferentes niveles que componen la cadena de suministro en cada uno de los dos casos.

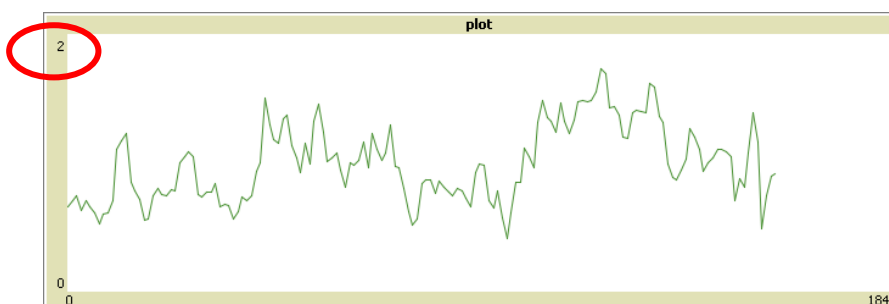


Figura 8.1. Distribución de la demanda del consumidor en el test B-3 (Fuente: Elaboración Propia).

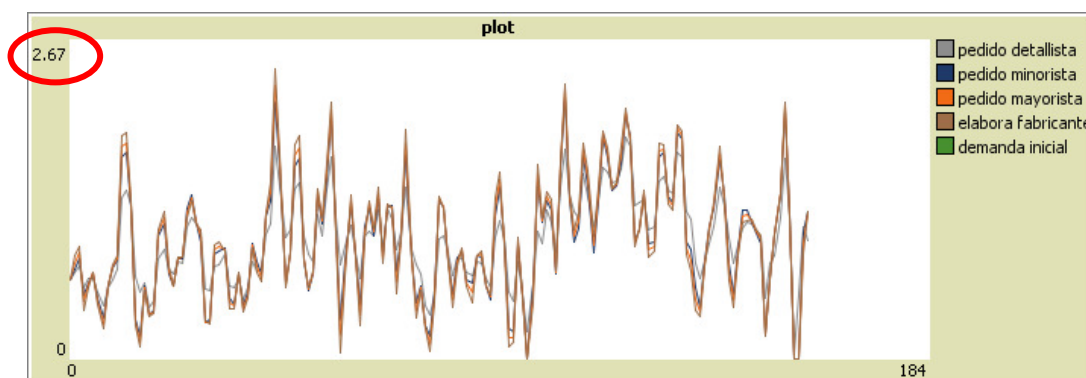


Figura 8.2. Resultado obtenido por el modelo multiagente desarrollado sin activar el Agente de Negociación en el test B-3 (Fuente: Elaboración Propia).

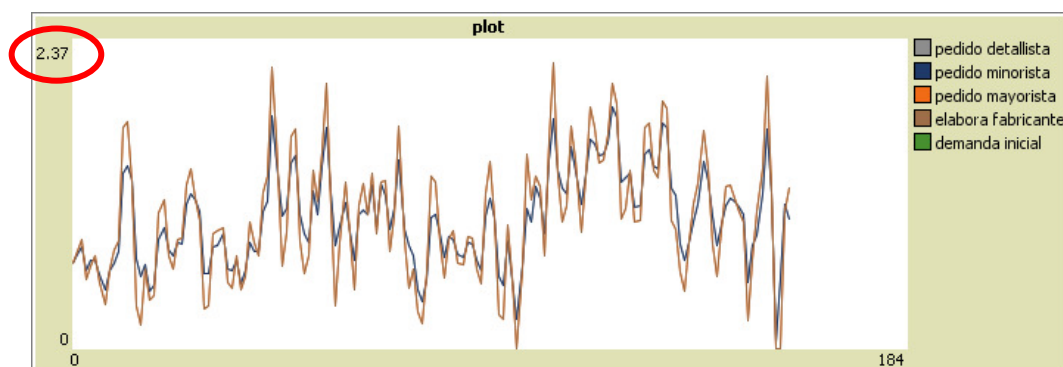


Figura 8.3. Resultado obtenido por el modelo multiagente desarrollado activando el Agente de Negociación en el test B-3 (Fuente: Elaboración Propia).

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Media Móvil con $N = 2$
Minorista	Media Móvil con $N = 2$
Mayorista	Media Móvil con $N = 14$
Fábrica	Media Móvil con $N = 14$

Tabla 6.2. Método óptimo de previsión para cada nivel sin activar el Agente de Negociación en el test B-3 (Fuente: Elaboración Propia).

Nivel	Método Óptimo de Previsión
Detallista	Media Móvil con $N = 2$
Minorista	Media Móvil con $N = 2$
Mayorista	Media Móvil con $N = 2$
Fábrica	Media Móvil con $N = 2$

Tabla 6.3. Método óptimo de previsión para cada nivel activando el Agente de Negociación en el test B-3  
(Fuente: Elaboración Propia).

### 8.3. Conclusiones.

El análisis llevado a cabo demuestra la eficacia de la cooperación entre agentes en la optimización de la gestión de la cadena de suministro. A través de compartir información entre ellos, dos a dos, se puede alcanzar una gran reducción en el Efecto Bullwhip. La *figura 8.4* ilustra la mejora de los resultados al considerar el Agente de Negociación en el modelo desarrollado. Esto concuerda con la base de los estudios de muchos autores sobre el Efecto Bullwhip, considerando que éste se genera a través del traslado de información defectuosa a la cadena de suministro. De la misma forma, también se ha visto que la simplificación de la estructura de la cadena de suministro ayuda en la mitigación de la amplificación de la variabilidad de los pedidos.

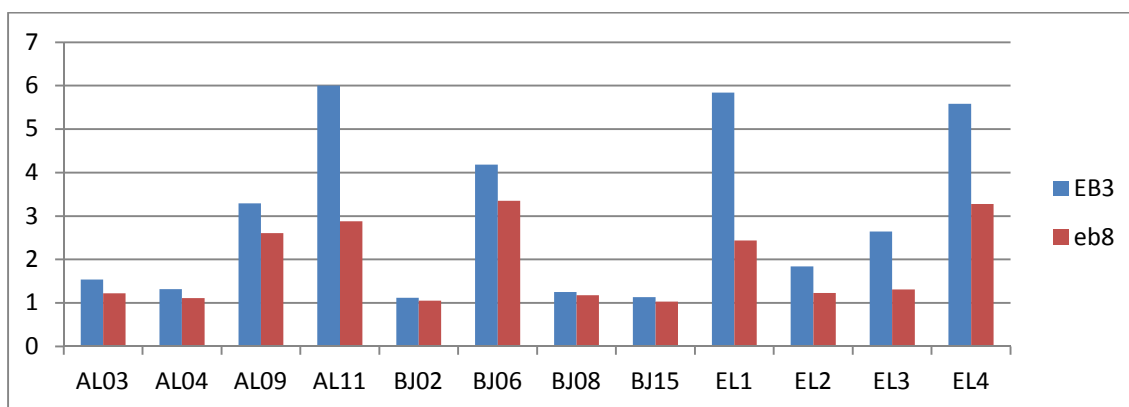


Figura 8.4. Mejora de los resultados ofrecida por el sistema multiagente al considerar el Agente de Negociación (Fuente: Elaboración Propia).

## 9. ESTUDIO DEL EFECTO BULLWHIP A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

### 9.1. Presentación.

Para concluir este trabajo, realizaremos una aproximación empírica al Efecto Bullwhip a través de técnicas de simulación no inteligentes (ver apartado 4.3.2) de la cadena de suministro. El principal objetivo de ello es valorar las ventajas e inconvenientes que ofrece esta alternativa frente a la utilización de un sistema multiagente, y, de esta forma, evaluar la posibilidad de incidir en esta línea de investigación de cara a trabajos futuros.

Para ello, hemos utilizado ARENA 11.0. Este programa, desarrollado por Rockwell Software, está orientado de la simulación de distintos procesos, con el objetivo de poder evaluar de forma eficaz la posible aplicación de nuevas ideas sin que esto suponga un elevado riesgo –en forma de coste, tiempo o peligrosidad– para la empresa.

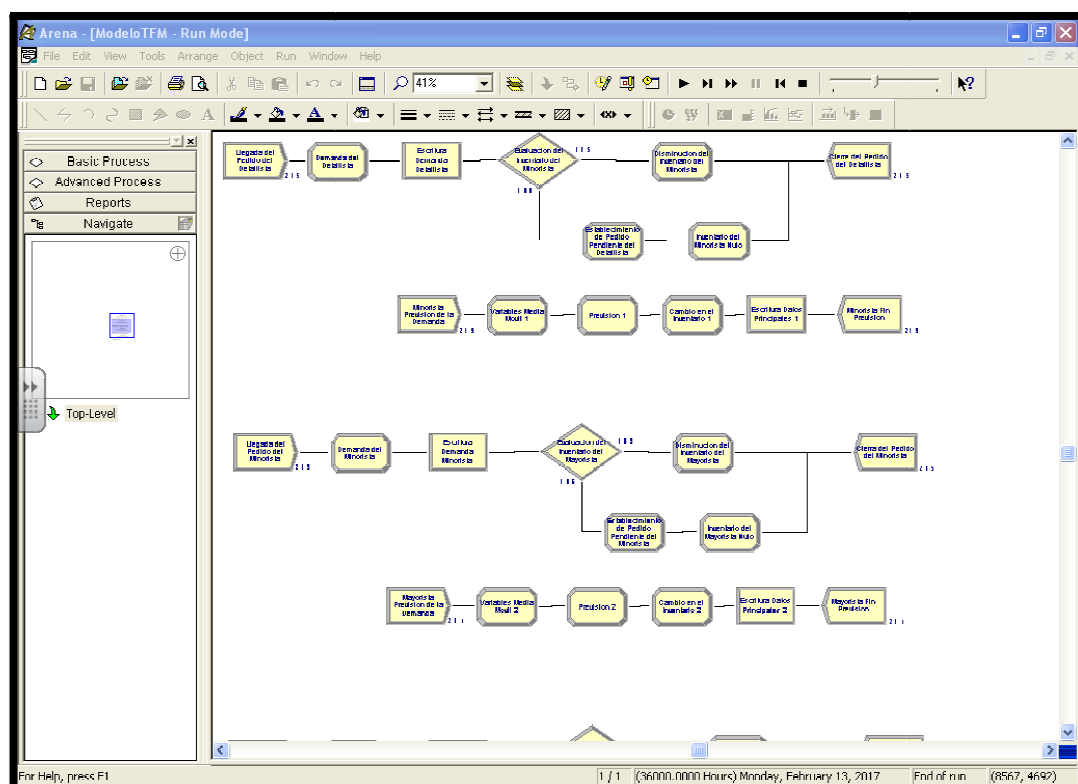
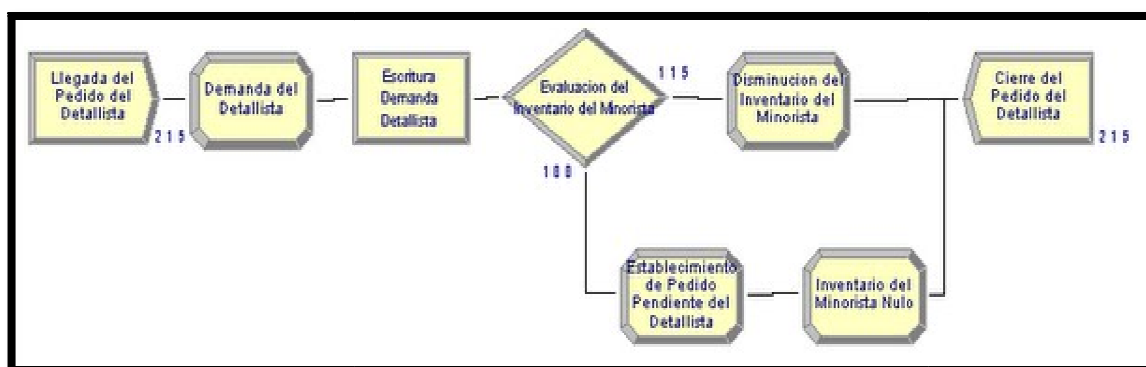


Figura 9.1. Captura de pantalla de una parte del modelo esquemático desarrollado en ARENA 11.0  
(Fuente: Elaboración Propia).

La *figura 9.1* representa una captura de pantalla del modelo implementado en ARENA 11.0, cuyas partes serán comentadas con más detalle a continuación.

Con el objetivo de poder llevar a cabo la comparación mencionada, se ha tratado de implementar en este software un modelo similar al desarrollado como sistema multiagente, explicado en el apartado 5, aunque con algunas diferencias para adaptarlo a este nuevo entorno. Las más relevante es que cada nivel realiza únicamente la previsión a través de una media móvil de 5 períodos, sin necesidad de que un Agente de Evaluación identifique cuál es la previsión óptima, algo en lo que nos podemos centrar en el modelo multiagente. Además, la unidad temporal en este caso son las semanas, de forma que cada nivel realiza un pedido por semana.

De esta forma, el modelo implementado en ARENA 11.0 se basa en cuatro canales de comunicación (uno entre Cliente y Detallista, otro entre Detallista y Minorista, otro entre Minorista y Mayorista, y el último entre Mayorista y Fabricante). Cada uno de ellos es similar al representado en la *figura 9.2*, que correspondería a la comunicación entre el Detallista y el Minorista. En él, la simulación comienza con la recepción, por parte del Minorista, del pedido realizado por el Detallista. A ese pedido, se le asigna la cantidad adecuada, almacenando esta información en un fichero externo para su posterior análisis. En ese momento, se evalúa si el inventario disponible por el minorista –que ha sido planificado en función de la previsión de la demanda realizada para cada período– es suficiente para hacer frente a la demanda. Si es suficiente, se disminuye el inventario del minorista y se realiza el envío. Si no es suficiente, se genera una rotura de stock, que será saldada en el próximo periodo, quedando el inventario del minorista a cero. En cualquiera de los dos casos, se cierra la comunicación entre ambos niveles de la cadena de suministro hasta el próximo período.



*Figura 9.2. Ejemplo del canal de comunicación entre Minorista y Detallista del modelo desarrollado en ARENA 11.0 (Fuente: Elaboración Propia).*

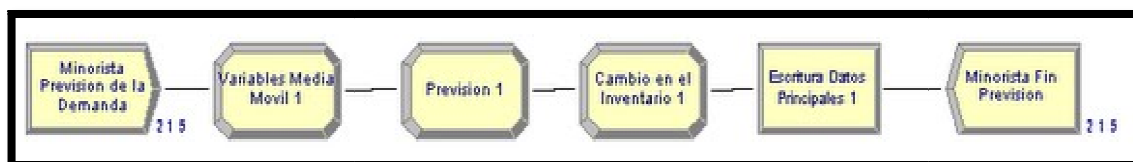


Figura 9.3. Ejemplo del sistema de previsión de la demanda del Minorista en el modelo desarrollado en ARENA 11.0 (Fuente: Elaboración Propia).

Además, el modelo está formado por cuatro sistemas de previsión de la demanda y realización del pedido, uno para cada uno de los cuatro niveles principales de la cadena de suministro. Cada uno de ellos será simulado una vez a la semana. Se basa en el almacenamiento de las cinco últimas demandas recibidas del nivel inferior de la cadena de suministro y, en base a ellas, la estimación de la demanda en el periodo siguiente. A partir de ahí, la previsión desemboca en el pedido a realizar por cada nivel, teniendo en cuenta además el inventario disponible y las roturas de stock generadas en el periodo anterior. Además, también se almacenan estos datos en un archivo externo de cara a su posterior análisis. A modo de ejemplo, el sistema de previsión de la demanda y realización del pedido del Minorista se adjunta en la *figura 9.3*.

No se especifican con más detalle las fórmulas implementadas en el modelo, ya que son las mismas que las utilizadas en el apartado 5.2.

## 9.2. Pruebas Realizadas: Análisis del Impacto del Stock de Seguridad.

Una vez desarrollado el modelo en ARENA 11.0, se han llevado a cabo diferentes pruebas sobre él, principalmente con el objetivo de poder evaluar las ventajas e inconvenientes que ofrece esta alternativa frente al planteamiento del problema como un sistema multiagente. No es objeto de este estudio la extracción de conclusiones sobre las causas del Efecto Bullwhip, sino exclusivamente la valoración de esta herramienta. El apartado 9.3 recoge estas conclusiones, entre las que destaca que la principal aplicación del modelo de simulación es la de estudiar las causas del Efecto Bullwhip, en términos de un análisis de sensibilidad<sup>49</sup>.

<sup>49</sup> El análisis de sensibilidad es un término empresarial, muy utilizado en la toma de decisiones, que consiste en evaluar el impacto de una determinada variable sobre un determinado índice de evaluación del rendimiento, a través de la modificación del valor de la citada variable, estudiando las modificaciones que ello conlleva sobre el índice.

A modo de ejemplo, se detallan los cálculos realizados para determinar el impacto del stock de seguridad<sup>50</sup> en la generación del Efecto Bullwhip a lo largo de una cadena de suministro. Para ello, se han realizado cinco simulaciones distintas. En la primera, todos los niveles de la cadena de suministro trabajan con un stock de seguridad nulo. En el resto, el stock de seguridad es 5 (bajo), 10 (medio), 20 (alto) y 40 (muy alto). En todos los casos, se ha considerado que la demanda sigue una distribución normal con media 100 y desviación típica 10. Además, se ha realizado, en cada uno de los cinco casos distintos, una simulación de 1500 días (aproximadamente 214 semanas)<sup>51</sup>, considerándose un periodo de entrenamiento<sup>52</sup> de 100 días (14 semanas).

La *tabla 9.1* recoge los resultados de las cinco pruebas, a través de la varianza de la demanda realizada por cada nivel<sup>53</sup>, el Efecto Bullwhip que se genera, expresado a través de la *ecuación 1* (apartado 2.4), y el aumento de este cociente respecto al caso en el que el stock de seguridad es nulo.

<i>Varianza</i>	<i>SS=0</i>	<i>SS=5</i>	<i>SS=10</i>	<i>SS=20</i>	<i>SS=40</i>
<b>Consumidor</b>	116,83	116,83	116,83	116,83	116,83
<b>Detallista</b>	170,42	170,19	170,20	170,91	175,15
<b>Minorista</b>	261,19	261,01	261,98	267,33	291,72
<b>Mayorista</b>	418,24	418,61	422,19	438,98	511,06
<b>Fabricante</b>	694,65	696,47	705,60	745,81	914,00
<b>Efecto Bullwhip</b>	5,946	5,961	6,039	6,384	7,823
<b>Aumento respecto SS=0</b>	-	0,25%	1,56%	7,37%	31,57%

*Tabla 9.1. Resultados de las pruebas en el análisis del impacto del stock de seguridad sobre el Efecto Bullwhip (Fuente: Elaboración Propia).*

Los resultados obtenidos muestran la relación, para la serie estudiada, entre el stock de seguridad y el Efecto Bullwhip generado en la cadena de suministro. Se ve como la consideración del stock de seguridad, con el objetivo de disminuir la probabilidad de rotura de stock, aumenta la amplificación de la variabilidad de las demandas. Sin embargo, este aumento es pequeño, en términos relativos, siempre y cuando el stock de seguridad utilizado no sea elevado. De esta forma, en este caso, para niveles de stock de

<sup>50</sup> El stock de seguridad se ha incluido en el modelo según se especifica en el apartado 5.3.3.

<sup>51</sup> Se ha visto que este periodo temporal es suficiente para verificar el modelo, es decir, para que la variabilidad de los resultados en diferentes simulaciones respecto a un valor medio esté por debajo del 5%.

<sup>52</sup> Se utiliza un periodo de entrenamiento –es decir, un periodo de simulación, al comienzo de la misma en el que no se tienen en cuenta los resultados– con el objetivo de tratar de evitar los efectos de los datos iniciales –se ha considerado un inventario inicial de 100 en cada nivel– sobre el resultado final.

<sup>53</sup> La demanda del fabricante, al igual que en el resto de apartados, coincidiría con el ritmo productivo que ha de llevar a cabo para responder a su demanda.



seguridad que podemos denominar “razonables”, su impacto sobre el Efecto Bullwhip es bajo. A partir de ahí, se dispara, tal y como se puede ver en la *figura 9.4*, que parece esbozar una relación exponencial entre ambas magnitudes. La *figura 9.5* representa la evolución de la varianza de las diferentes demandas, en las cinco pruebas distintas.

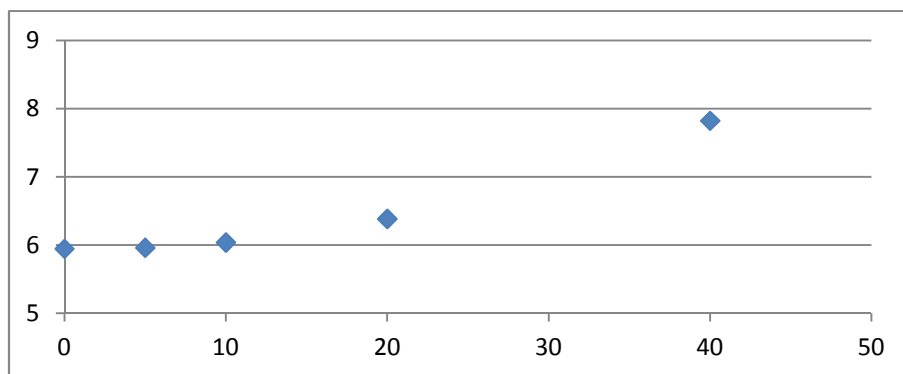


Figura 9.4. Relación entre el stock de seguridad y el Efecto Bullwhip (Fuente: Elaboración Propia).

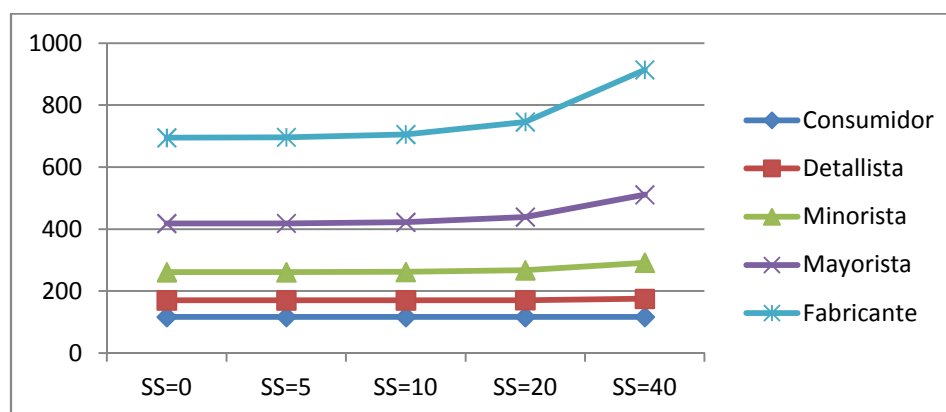


Figura 9.5. Relación entre el stock de seguridad y el Efecto Bullwhip (Fuente: Elaboración Propia).

La *figura 9.6* representa, como ejemplo, la variación de de las demandas en los diferentes niveles de la cadena de suministro durante treinta semanas intermedias de una de las distintas simulaciones realizadas.

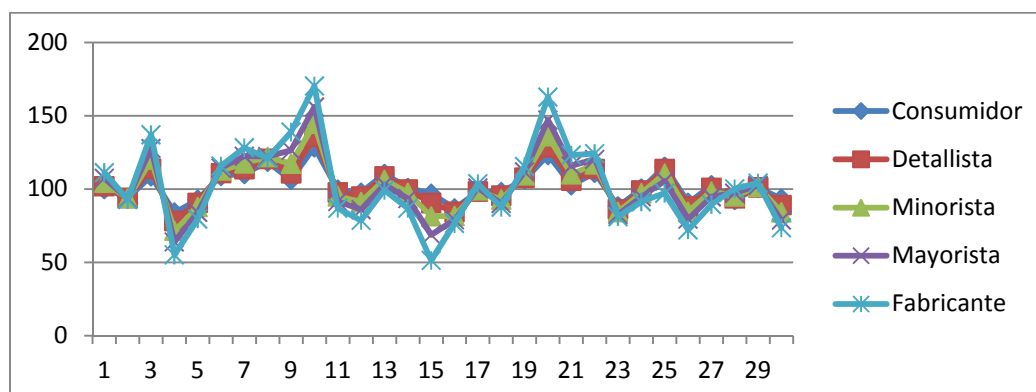


Figura 9.6. Variación de las demandas desde la semana 171 a la semana 200 en la simulación realizada para Stock de Seguridad 40 (Fuente: Elaboración Propia).

### **9.3. Análisis Comparativo de Herramientas.**

Tras haber desarrollado e implementado ambas herramientas en base a un modelo similar, y una vez analizadas las mismas con suficiente detalle, se puede concluir, a grandes rasgos, que:

- El planteamiento del problema a través de un sistema multiagente es una alternativa idónea para el desarrollo de un software inteligente, con capaz de decidir, en base a un conjunto de soluciones disponibles, la óptima para el sistema, de acuerdo a unos criterios de selección prefijados, relacionados con la mejora en la gestión de la cadena de suministro. A través de la coordinación entre los distintos agentes con los que se simula cada nivel, esta opción permite dividir un problema de elevada complejidad en un conjunto de problemas de menor dimensión. Además, es posible introducir métodos de previsión avanzados, que ofrezcan un elevado rendimiento en la reducción del Efecto Bullwhip.
- El sistema multiagente también permite analizar las causas del Efecto Bullwhip, especialmente la principal, relacionada con los errores en las previsiones de las demandas. Sin embargo, para análisis de sensibilidad, basados en el estudio del impacto de un determinado parámetro cuantitativo sobre el Efecto Bullwhip, la simulación es una herramienta más adecuada, dada la sencillez y eficacia con la que permite realizar este estudio. A través de la simulación del sistema, un periodo de tiempo lo suficientemente grande, en las distintas condiciones a valorar, es posible concluir cuál es la mejor alternativa, asumiendo un mínimo riesgo. A partir de ahí, se puede lograr una mejor comprensión del fenómeno, que permita mitigar su aparición con el objetivo de disminuir sus consecuencias en la cadena de suministro.

## 10. CONCLUSIONES

Diversos han sido los cambios en el macroentorno empresarial durante las dos últimas décadas que han dibujado un nuevo contexto competitivo, en el que la función de producción ha adquirido una importancia estratégica. Dentro de la misma, la gestión de la cadena de suministro es en la actualidad una de las principales preocupaciones de las empresas, siendo comprendida como una fuente clave en la búsqueda de ventajas competitivas.

Desde esa perspectiva, la optimización de la gestión de la cadena de suministro lleva inexorablemente a mencionar el Efecto Bullwhip, una de las principales fuentes de ineficiencias en dicha gestión. Este fenómeno, cuya existencia es evidenciada por múltiples trabajos, es definido como la amplificación de la variabilidad de los pedidos transmitidos a lo largo de la cadena de suministro, de forma que la demanda soportada por el fabricante tiende a ser mucho más variable que la requerida por el cliente. Este hecho desemboca en considerables pérdidas económicas en los distintos miembros que forman la cadena de suministro, principalmente, a través de un aumento de los costes laborales, de los costes de rotura de stock, de los costes de almacenamiento, de los costes de obsolescencia y de los costes de transporte.

Es por ello que han sido muchos los autores que han insistido en la correcta comprensión del Efecto Bullwhip, a través de la búsqueda de las causas que lo generan, como paso previo a la identificación de medidas que permitan su disminución. Destaca el trabajo de Lee et al. (1997) que defienden que, si en una cadena de suministro se dieran ciertas condiciones de estabilidad, todos los agentes podrían conocer con exactitud la demanda en el origen y ajustar sus políticas a tales hechos, de forma que no se generaría Efecto Bullwhip. Para los citados autores, las causas principales, que alejan la situación real de las condiciones de estabilidad mencionadas, son:

- Errores en las previsiones de las demandas.
- Agrupación de los pedidos en lotes.
- Variaciones del precio de los productos.
- Especulación y sobreprotección.

Pese a su antigüedad, el citado estudio, a nuestro juicio, sintetiza a la perfección las causas detectadas y mencionadas por muchos otros autores alrededor de la generación del Efecto Bullwhip. Además de ellas, podemos hablar de otros factores contextuales que pueden favorecer o dificultar la aparición del Efecto Bullwhip en una cadena de suministro, como puede ser la estructura de la misma o los mecanismos de control y comunicación que la coordinan.

De esta forma, se puede considerar que las principales causas del Efecto Bullwhip subyacen del traslado de información defectuosa a la cadena de suministro. Sin embargo, la cesión de información verídica no es gratuita, sino que existen importantes barreras a la misma. A partir de esta consideración, se han ideado una amplia gama de formas de colaboración entre los distintos miembros de la cadena de suministro, según la relación entre los datos facilitados y la contraprestación exigida. Son las denominadas soluciones tradicionales al Efecto Bullwhip, y engloban prácticas modernas como las Tecnologías de la Información, el *Vendor Managed Inventory (VMI)* o el *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR)*.

En la última década, además, han aparecido nuevas técnicas para tratar de combatir la generación del Efecto Bullwhip en la cadena de suministro basadas en la Inteligencia Artificial. Y es que la gestión de la cadena de suministro es un problema de elevada complejidad, condicionado por la interacción entre distintos agentes, cada uno de los cuales ha de atender a un elevado número de variables, que tiende a desarrollarse en entornos cada vez más inciertos. En este contexto, son múltiples los estudios que han demostrado que los Sistemas Multiagente, una parte de la Inteligencia Artificial Distribuida, son una alternativa eficaz para afrontar este problema. Destacan, entre otros, los trabajos de Kimbrough et al. (2002) y Wu et al. (2010).

A partir de ahí, el documento describe una aplicación de la metodología multiagente orientada a la reducción del Efecto Bullwhip en una cadena de suministro, que permite a su vez el estudio de sus causas. Ésta es representada como un sistema multiagente global, formado por cuatro subsistemas multiagente. Cada uno de ellos hace referencia a uno de los niveles de la cadena de suministro lineal a considerar (Detallista, Minorista, Mayorista y Fabricante). Cada subsistema multiagente, a su vez, está compuesto por seis agentes diferentes:

- Agente de Información, que almacenará la información más relevante sobre la previsión y planificación de cada nivel.

- Agente de Comunicación, que permite la conexión del nivel con el resto de niveles de la cadena de suministro y con el usuario, a través de una interfaz.
- Agentes de Previsión, orientados a realizar la previsión de la demanda, en base a diferentes métodos, según los datos históricos disponibles.
- Agente de Planificación, que realiza la planificación de la producción en base a las previsiones realizadas por el agente anterior.
- Agente de Evaluación, que selecciona, en función de un criterio introducido relacionado con la minimización del Efecto Bullwhip, la previsión óptima de cada nivel.
- Agente de Negociación, que introduce en el sistema la posibilidad de colaboración entre los distintos niveles de la cadena.

Las pruebas realizadas sobre los datos de partida, tanto series temporales simuladas como reales, evidencian que el método de previsión 1-1 de la demanda amplifica enormemente la variabilidad del pedido del consumidor final a lo largo de la cadena de suministro en todos los casos, especialmente cuando dicha demanda tiene un elevado grado de aleatoriedad. En este contexto, la aplicación del modelo multiagente, con otros métodos de previsión, permite reducir considerablemente el Efecto Bullwhip generado. La tendencia y la estacionalidad de la serie condicionan en gran medida el resultado de la herramienta desarrollada, aunque en todos los casos se mejora significativamente el rendimiento del método 1-1, demostrando así su eficacia. De aquí se deriva la enorme importancia de la previsión de las demandas en la mitigación del Efecto Bullwhip.

Para desarrollar la herramienta, se han considerado exclusivamente métodos de previsión simples, como medias móviles y alisados exponenciales, de forma que cada nivel utilice el que mejor se adapta a la demanda que debe atender. Con ellos, ya se ha logrado alcanzar grandes reducciones. Aún así, también se ha visto que la inclusión de métodos más avanzados de previsión, como las técnicas ARIMA, permiten mejorar más el rendimiento del sistema, planteando así su futura incorporación al mismo.

Por otro lado, se ha analizado la relación entre los costes de rotura de stock y los costes de almacenamiento, y su repercusión en la gestión de la cadena de suministro, concluyendo que el miedo a la rotura de stock es una de las principales causas de la generación del Efecto Bullwhip. El desarrollo, por parte de cada nivel, de una política que tienda a minimizar el riesgo de rotura de stock deriva en un gran incremento del

Efecto Bullwhip y, paradójicamente –aunque a consecuencia de lo anterior–, en un aumento de la rotura de stock media generada en la cadena de suministro.

También se ha analizado el efecto de la negociación, a través de la colaboración, entre los distintos niveles de la cadena de suministro, verificando que es una solución adecuada orientada a la mitigación de la amplificación de la variabilidad de los pedidos. De esta forma, la simplificación de la estructura de la cadena lleva a la disminución del Efecto Bullwhip.

En estas circunstancias, el planteamiento del problema a través de un sistema multiagente permite desarrollar un software inteligente, con capaz de decidir la política óptica de cada nivel de la cadena de suministro en términos de reducción del Efecto Bullwhip. A partir de ahí, permite estudiar sus causas. Sin embargo, para realizar análisis de sensibilidad, que evalúan el impacto de determinados parámetros cuantitativos sobre el cociente, es más adecuado acudir a técnicas de simulación, que permiten replicar con sencillez el comportamiento del modelo a lo largo del tiempo para diversos valores de la variable de estudio, con el objetivo de determinar cuál es su valor óptimo. A modo de ejemplo, se ha llevado a cabo el análisis del impacto del stock de seguridad sobre el Efecto Bullwhip, observando cómo, para una serie temporal analizada, si bien cualquier stock de seguridad provoca un aumento de la variabilidad de los pedidos a lo largo de la cadena de suministro, este hecho no es significativo para valores bajos o medios del stock de seguridad.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Abraham y Ledolter, 1983] Abraham, B.; Ledolter, J. (1983): *Statistical Methods for Forecasting*. New York Wiley.
- [Agrawal et al., 2009] Agrawal, S.; Sengupta, R. N.; Shanker, K. (2009): *Impact of information sharing and lead time on the bullwhip effect and on-hand inventory*. Eur. J. Oper. Res. Vol. 192(2), pp. 576-593.
- [Akanle y Zhang, 2008] Akanle, O., Zhang, DZ. (2008): *Agent-based model for optimising supply-chain configurations*. International Journal of Production Economics. Vol. 115(2), pp. 444-460.
- [Andel, 1996] Andel, T. (1996): *Manage Inventory, Own Information*. Transportation & Distribution. Vol. 37(5), pp. 54-58.
- [Bahroun et al., 2010] Bahroun, Z., Moalla, M., Baazaoui, G., Campagna, J. P. (2010): *Multi-agent modelling for replenishment policies simulation in supply chains*. European Journal of Industrial Engineering. Vol. 4(4), pp. 450-470.
- [Ballou et al., 2000] Ballou, R. H.; Gilbert, S. M.; Mukherjee, A. (2000): *New material challenges from supply chain opportunities*. Industrial Marketing Management. Vol. 29, p. 7-18.
- [Bhattacharya y Bandyopadhyay, 2010] Bhattacharya, R.; Bandyopadhyay, S. (2010): *A review of the causes of bullwhip effect in a supply chain*. Int. J. Adv. Manuf. Tech. Vol. 54, pp. 1245-1261.
- [Bishop et al, 1994] Bishop, W.S.; Graham, J.L.; Jones, M.H. (1994): *Volatility of derived demand in industrial markets and its management implications*. Journal of Marketing. Vol. 48(4), pp. 95-103.
- [Box y Jenkins, 1976] Box, G. E. P., Jenkins, G. M. (1976): *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day, San Francisco.
- [Boute y Lambrecht, 2009] Boute, R.; Lambrecht, M. (2009): *Exploring the Bullwhip Effect by Means of Spreadsheet Simulation*. Open access publications form Katholieke Universiteit Leuven.



- [Bowersox et al., 1999] Bowersox, D.J.; Stank, T.P.; Daugherty, P.J. (1999): *Lean launch: Managing product introduction risk through response-based logistics*. Journal of Product Innovation Management. Vol 16(6), pp. 557-568.
- [Cachon, 1999] Cachon G. P. (1999): *Managing supply chain demand variability with scheduled ordering policies*. Management Science. Vol. 45(6), pp. 843-856.
- [Carbonneau et al., 2008] Carbonneau, R.; Laframboise, K. and Vahidov, R. (2008): *Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting*. European Journal of Operational Research. Vol. 184, pp. 1140-1154.
- [Carlsson y Fuller, 2000] Carlsson, C.; Fuller, R. (2000). *A fuzzy approach to the Bullwhip Effect*. Cybernetic and System'2000. Proceedings of the 15<sup>th</sup> European Meeting on Cybernetic and Systems Research. Viena.
- [Chaharsooghi et al., 2008] Chaharsooghi, S. K.; Faramarzi, H.; Heydari, J. (2008): *A simulation study on the impact of forecasting methods on the bullwhip effect in the supply chain*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Managemtn, Singapur, pp. 1875-1879.
- [Chang et al., 2007] Chang, T. H.; Fu, H. L.; Lee, W. I.; Lin, Y.; Hsueh, H. C (2007): *A study of an augmented CPFR model for the 3C retail industry*. Supply Chain Management. Vol. 12(3), pp. 200-209.
- [Chau y Liu, 2004] Chau, P. Y.; Liu, V. (2004): *Adoption of EDI in Small and Medium Sized Enterprises*. Advanced Topics in Global Information Management, Vol. 3.
- [Chen et al., 2000] Chen, F.; Ryan, J. K.; Simchi – Levi, D. (2000): *The impact of exponential smoothing forecasts on the Bullwhip Effect*. Nav. Res. Logist. Vol 47 (4), pp. 299-306.
- [Chen y Disney, 2007] Chen, Y. F.; Disney S. M. (2007): *The myopic order-up-to policy with a proportional feedback controller*. Int. J. Prod. Res. Vol. 45 (2), pp. 351–368.
- [Chen y Lee, 2009] Chen, L.; Lee Hau, L. (2009): *Information Sharing and Order Variability Control Under a Generalized Demand Model*. Management Science. Vol. 55(5), pp. 781-797.

- [Chopra y Meindl, 2006] Chopra, S.; Meindl, P. (2006): *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- [Christopher, 1992] Christopher, M. (1992): *Logistics and Supply Chain Management*. Pitman Publishing, London.
- [Christopher, 2000] Christopher, M. (2000): *The agile supply chain: Competing in volatile markets*. *Industrial Market Management*. 29(1), pp. 37-44.
- [Cowan, 2004] Cowan, S. (2004): *Demand shifts and imperfect competition*. Working paper, Department of Economics, University of Oxford, Oxford, UK.
- [Davenport, 1993] Davenport, T.H. (1993): *Process Innovation, Reengineering work through information technology*. Harvard Business School Press. Cambridge, MA.
- [Davis, 1987] Davis, S. M. (1987): *Future Perfect*. Reading. Addison-Wesley Publishing Company.
- [De la Fuente y Lozano, 2007] De la Fuente, D.; Lozano, J. (2007): *Application of distributed intelligence to reduce the bullwhip effect*. *International Journal of Production Research*. Vol. 44(8), pp. 1815-1833.
- [DesMarteu, 1998] DesMarteu, K. (1998): *New VICS publication provides step-by-step guide to CPFR*. *Bobbin*. Vol. 40(3), p. 10.
- [Disney y Towill, 2002] Disney, S. M., Towill, D. R. (2002): *Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chain*. *International Journal of Production Economics*. Vol. 78, pp. 133-144.
- [Disney y Towill, 2003a] Disney, S. M.; Towill, D. R. (2003): *The effect of Vendor Managed Inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip effect in supply chain*. *International Journal of Production Economics*. Vol. 85, pp. 199-215.
- [Disney y Towill, 2003b] Disney, S. M., Towill, D. R. (2003): *On the Bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy*. *Omega*. Vol. 31, pp. 157-167.
- [Disney et al., 2005] Disney, S.M.; Farasyn, I.; Lambrecht, M.; Towill, D.R.; Van de Velde, W. (2005). *Taming the Bullwhip Effect whilst watching customer*

*service in a single supply chain echelon.* European Journal of Operational Research.

- [Forrester, 1961] Forrester, J. W. (1961): *Industrial dynamics*, MIT Press. Cambridge, MA.
- [Fox et al., 1993] Fox, M. S., Chionglo, J. F., Barbuceanu, M. (1993): *The Integrated Supply Chain Management System*. Internal Report, Dept. of Industrial Engineering, Univ. of Toronto.
- [Fransoo y Wouters, 2000] Fransoo, J. C.; y Wouters, M. J. (2000): *Measuring the bullwhip effect in the supply chain*. Supply Chain: An International Journal. Vol 5 (2), pp. 78-79.
- [Gaalman y Disney, 2006] Gaalman, G.; Disney, S. M. (2006): *State space investigation of the bullwhip problem with ARMA (1, 1) demand processs*. Int. J. Prod. Econ. Vol. 104 (2), pp. 327-339.
- [Gattorna, 2000] Gattorna J. (2010): *Dynamic Supply Chains*. FT Prentice Hall, London.
- [Geary et al., 2006] Geary, D.; Disney, S. M.; Towill, D. R. (2006): *On bullwhip in supply chains –historical review, present practice and expected future impact*. International Journal of Production Research. Vol. 101 (1), pp. 2-18.
- [Graves, 1999] Graves, S.C. (1999): *A single-item inventory model for a nonstationary demand process*. Manuf. Serv. Oper. Manag. Vol 1 (1), pp. 50-61.
- [Gunasekaran et al., 2008] Gunasekaran, A.; Lai, K.-H.; Cheng, T.C. (2008): *Responsive supply chain: A competitive strategy in a networked economy*. Omega: International Journal for Management Science. Vol. 36(4), pp. 549-564.
- [Hamister y Suresh, 2008] Hamister, J. W.; Suresh, N.C. (2008): *The Impact of Pricing Policy on Sales Variability In a Supermarket Retail Context*. Int. J. Prod. Econ. Vol. 111(2), pp. 441-455.
- [Harris et al., 1999] Harris, J. K.; Swatman, P. M. C.; Kurnia, S. (1999): *Efficient Consumer Response: A Survey of the Australian Grocery Industry*. Supply Chain Management: An International Journal. Vol. 4(1), pp. 35-42.

- [Hernández et al., 2010] Hernández, J. E., Poler, R., Mula, J., De La Fuente, D. (2010): *Collaborative Tactical Planning in Multi-level Supply Chains Supported by Multiagent Systems*. Balanced Automation Systems For Future Manufacturing Networks. Book Series: IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol. 322, pp. 260-267.
- [Higuchi y Troutt, 2004] Higuchi, T.; Troutt, M. D. (2004): *Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product – lessons from the Tamagotchi case*. Comput. Oper. Res. Vol 31 (2), pp. 1097–1114.
- [Holland y Sodhi, 2004] Holland, W.; Sodhi, M. S. (2004): *Quantifying the effect of the batch size and order errors on the bullwhip effect using simulation*. Int. J. Logistics Res. Apl. Vol 7 (3), pp. 251-261.
- [Holmstrom, 1998] Holmstrom, J. (1998): *Product range management: a case study of supply chain operations in the European grocery industry*. Supply Chain Management. Vol. 2(3), pp. 107–115.
- [Hosoda y Disney, 2004] Hosoda, T.; Disney, S.M. (2004): *An analysis of a three echelon supply chain model with a minimum mean squared error forecasting*. Second World Production and Operations Management Conference, Mexico, pp 1-24.
- [Islam y Meade, 1997] Islam, T.; Meade, N. (1997): *The diffusion of successive generations of a technology: a more general model*. Technol Forecast Soc. Change. Vol. 56 (1), pp. 49-60.
- [Jain y Deshmukh, 2009] Jain, V., Deshmukh, S. G. (2009): *Dynamic supply chain modeling using a new fuzzy hybrid negotiation mechanism*. International Journal of Production Economics. Vol. 122(1), pp. 319-328.
- [Ji y Yang, 2005] Ji, Y. F., Yang, H. L. (2005): *Bullwhip Effect Elimination in Supply Chain with CPFR*. Proceedings of the 2005 International Conference on Management Science & Engineering. Vol 1-3, pp. 737-740.
- [Jiménez y Hernández, 2002] Jiménez, J.E.; Hernández, S. (2002): *Marco conceptual de la cadena de suministro: Un nuevo enfoque logístico*. Instituto Mexicano del Transporte. Edición 215.

- [Kelly, 1995] Kelly, K. (1995): *Burned by Busy Signals: Why Motorola Ramped up Production Way Past Demand*. Business Week, 6 March 1995, p. 36.
- [Kim y Cho, 2010] Kim, H. S., Cho, J. H. (2010): *Supply chain formation using agent negotiation*. Decision Support Systems. Vol. 49(1), pp. 77-90.
- [Kimbrough et al., 2002] Kimbrough, S. O., Wu, D. J., Zhong, F. (2002): *Computer the beer game: can artificial manage supply chains?* Decision Support Systems. Vol. 33, pp. 323-333.
- [Lambert et al., 2001] Lambert, J.; Douglas, M.; Terrance L. (2001): *Supply Chain Metrics*. International Journal of Logistics Managment. Vol. 12.
- [Lee et al., 1997] Lee, H. L.; Padmanabhan, V.; Whang, S. (1997): *The bullwhip effect in supply chains*. Sloan Management Review. Vol. 38(3), pp. 93-102.
- [Liang y Huang, 2006] Liang, W. Y., Huang, C. C. (2006): *Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain*. Decision Support Systems. Vol. 42(1), pp. 390-407.
- [Liao y Shyu, 1993] Liao, C. J.; Shyu C. H. (1993): *An analytical determination of lead time with normal demand*. International Journal of Operations and Production Management. Vol. 11, pp. 72-78.
- [Lynn et al., 1999] Lynn, G. S.; Schnaars, S. P.; Skov, R. B. (1999): *A survey of new product forecasting practices in industrial high technology and low technology businesses*. Ind. Mark. Manag. Vol. 28 (6), pp. 565-571.
- [Manchuca y Barajas, 2004] Machuca, J. A., Barajas, R. (2004): *The impact of electronic data interchange on reducing bullwhip effect and supply chain inventory costs*. Transportation Research Part E. Vol. 40, pp. 209-228.
- [Mangina y Vlachos, 2005] Mangina, E., Vlachos, I. P. (2005): *The changing role of information technology in food and beverage logistics management: Beverage network optimisation using intelligent agent technology*. Journal of Food Engineering. Vol. 70(3), pp. 403-420.
- [Manyem y Santos, 2009] Manyem, P.; Santos, D. (1999): *Factors that Influence the Bullwhip Effect and its Impact on Profitability: A Simulation Study of Supply Chains*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice. San Antonio.

- [Mason – Jone y Towill, 1999] Mason – Jone, R.; Towill, D. R. (1999): *A using the information decoupling point to improve the supply chain performance*. International Journal of Logistics Management. Vol. 10, pp. 13-26.
- [Maturana et al., 1999] Maturana, F., Shen, W., Norrie, D. (1999): *Metamorph: an adaptive agentbased architecture for intelligent manufacturing*. International Journal of Production Research. Vol. 37(10), pp 2159-2173.
- [Magee, 1958] Magee, J. F. (1958): *Production planning and inventory control*. McGraw-Hill Book Company. New York, pp. 80-83.
- [Martín – Andino y Sarabia, 2006] Martín – Andino, R. (doctorando); y Sarabia, Á. (tutor) (2006): *El Efecto Bullwhip en las Cadenas de Suministro y la dependencia de los agentes que la integran*. Tesis para la obtención del grado de Doctor. Departamento de Organización Industrial, Universidad Pontificia de Comillas. Madrid.
- [McCarthy et al., 1955] McCarthy, J.; Minsky, M.; Rochester, N.; Shannon, C.; (1955): *A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence*. Technical Report.
- [McKinsey, 1992] McKinsey, J. (1992): *Evaluating the Impact of Alternative Store Formats*. Supermarket Industry Convention. Food Marketing Institute, Chicago.
- [Merkureyev et al., 2002] Merkureyev, Y.; Petuhova, J.; Buikis, M. (2004): *Simulation based statistical analysis of the bullwhip effect in supply chains*. 18<sup>th</sup> European Simulation Multiconference Networked Simulations and Simulaed Networks ESM 2004, pp. 13-16.
- [Metters, 1997] Metters, R. (1997). *Quantifying the Bullwhip Effect in Supply Chains*. Journal of Operations Management. Vol. 15, pp. 89-100.
- [Mira et al., 1995] Mira, J.; Delgado, A. E.; Boticario, J. G.; Díez, J. (1995): *Aspectos básicos de la Inteligencia Artificial*. Sanz y Torres. Madrid.
- [Moncayo - Martínez y Zhang, 2011] Moncayo - Martínez, L. A., Zhang, D. Z. (2011): *Multi-objective ant colony optimization: A meta-heuristic approach to supply chain design*. International Journal of Production Economics. Vol. 131(1), pp. 407-420.

- [Moyaux et al., 1994] Moyaux, T., Chaib-draa, B., D'Amours, S. (2004): *An agent simulation model for the Quebec forest supply chain*. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Vol. 3191, pp.226–241.
- [Muth, 1960] Muth, J.F. (1960): *Optimal properties of exponentially weighted forecasts*. J. Am. Stat. Assoc. Vol 55 (290), pp. 290-336.
- [Nienhaus et al., 2006] Nienhaus, J.; Ziegenbein, A.; Schoensleben, P. (2006): *How the human behavior amplifies the bullwhip effect –a study based on the beer distribution game online*. Prod. Plan Control. Vol. 17(6), pp. 547-557.
- [O'Connor, 1994] O'Connor, R. J. (1994): *Rumor Bolsters IBM Shares*. San José Mercury News, 8 October 1994, p. 9.
- [Oubiña, 2002] Oubiña, J. (2002): *ECR o Respuesta Eficiente al Consumidor*. Distribución y Consumo, Universidad Autónoma de Madrid. Junio 2002, p. 70.
- [Özelkan y Çakanyildirim, 2009] Özelkan, E. C.; Çakanyildirim, M. (2009): *Reverse Bullwhip Effect in pricing*. Eur. J. Oper. Res. Vol. 192 (1), pp. 302-312.
- [Pine y Davis, 1999] Pine, J.; Davis, S. (1999): *Mass customization: the new frontier in business competition*. Harvard Business School Press.
- [Pino, 2000] Pino, R. (2000): *Previsión de Series Temporales Mediante Redes Neuronales Artificiales: Una Aplicación al Mercado Eléctrico Español*. Tesis para la obtención del grado de Doctor. Departamento de Organización de Empresas, Universidad de Oviedo. Gijón.
- [Porter, 1987] Porter, M. (1987): *From Competitive Advantage to Corporate Strategy*. Harvard Business Review.
- [Potter y Disney, 2006] Potter, A.; Disney, S. M. (2006): *Bullwhip and Batching: An Exploration*. Int. J. Prod. Econ. Vol. 104 (2), pp. 408-418.
- [Reiner y Fichtinger, 2009] Reiner, G.; Fichtinger, J. (2009): *Demand forecasting for supply processes in consideration of pricing and market information*. Int. J. Prod. Econ. Vol. 118 (1), pp. 55-62.
- [Robins, 1994] Robins, G. (1994): *Sailing into ECR's uncharted waters*. Stores. Vol. 76(10), pp. 43-44.

- [Saber et al., 2012] Saber, S., Nookabadi, A. S., Hejazi, S. R. (2012): *Applying Agent-Based System and Negotiation Mechanism in Improvement of Inventory Management and Customer Order Fulfilment in Multi Echelon Supply Chain*. Arabian Journal for Science and Engineering. Vol. 37(3), pp. 851-861.
- [Sagar, 2003] Sagar, N. (2003): *CPFR at Whirlpool Corporation: Two heads and an exception engine*. Journal of Business Forecasting Methods & Systems. Vol. 22(4), p. 3.
- [Schiller, 1994] Schiller, Z. (1994): *Ed Artzt's Elbow Grease Has P&G Shining*. Business Web. 5 August 1996, pp. 82-83.
- [Shen et al., 1998] Shen, W., Xue, D., Norrie, D. H. (1998): *An Agent-Based Manufacturing Enterprise Infrastructure for Distributed Integrated Intelligent Manufacturing Systems*. In Proceedings of the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Systems PAAM'98, London, UK.
- [Sima et al., 2007] Sima, K.; Zhang, Y.; Ying, M.; Chen, J. (2007): *The Impact of Forecasting with Kalman Filter on the Bullwhip Effect*. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Honolulu, Hawaii, pp 4698-4701.
- [Simchi – Levi et al., 2000] Simchi – Levi, D.; Kaminsky P.; Simchi – Levi, E. (2000): *Designing and Managing the Supply Chain*. Irwin – McGraw Hill. Boston.
- [Skiadas, 1986] Skiadas, C. H. (1986): *Innovation diffusion models expressing asymmetry and / or positively or negatively influencing forces*. Technol Forecast Soc. Change. Vol. 30 (4), pp. 313-330.
- [Smart, 1996] Smart, T. (1996): *Jack Welch's Cyber Car*. Business Week. 5 August 1996, pp. 82-83.
- [Sohn y Lim, 2008] Sohn, S. Y.; Lim, M. (2008): *The effect of forecasting and information sharing in SCM for multi-generation products*. Int. Jour. Of Oper. Res. Vol. 1986, pp. 276-287.
- [Stalk, 1988] Stalk, G. (1998): *Time – The next source of competitive advantage*. Harvard Business Review. Julio – Agosto 1988, pp. 41-53.



- [Sterman, 1989] Sterman, J. D. (1989): *Modelling managerial behaviour: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment*. Management Science. Vol. 35(3), pp. 321-339.
- [Svensson, 2003] Svensson, G. (2003): *The Bullwhip Effect in Intra-organisational echelons*. Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag. Vol. 33 (2), pp. 103-131.
- [Sun y Ren, 2005] Sun, H. X.; Ren Y. T. (2005): *The impact of forecasting methods on bullwhip effect in supply chain management*. IEEE International Engineering Management Conference I, pp. 215-219.
- [Swaminathan et al., 1996] Swaminathan, J. M., Smith, S. F., Sadeh, N. M. (1996): *Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach*. Decision Sciences. Vol. 29(3), pp. 607-632.
- [Taylor, 1999] Taylor, D. H. (1999): *Measurement and analysis of demand amplification across the supply chain*. Int. J. Retail. Distrib. Manag. Vol. 35(4), pp. 55-70.
- [Valls, 2006] Valls, A. (1996): *Las doce habilidades directivas clave*. Gestión 2000. España.
- [Wilensky, 1999] Wilensky, U. (1999): *NetLogo*. Northwestern University, Evanston, IL: The Center for Connected Learning and Computer - Based Modeling. Retrieved from <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [Walton y Lewis, 1995] Walton, L. W.; Lewis, P. A. (1995): *Shipper, Carrier, and Consultant Perspectives of EDI: Strategies for Successful Implementation in the Motor Carrier Industry*. Transportation Journal, Vol. 36(1), pp. 43-50.
- [Wang et al., 2008] Wang, X.; Liu, Z.; Zheng, C.; Quan, C. (2008): *The Impact of Lead-time on the Bullwhip Effect in Supply Chain*. Proceedings – ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management, pp. 93-97.
- [Williams, 1999] Williams, S. H. (1999): *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*. Hospital Materiel Management Quarterly. Vol. 21(2), pp. 44-58.
- [Wu et al., 2011] Wu, S. N., Gan, W. H., Wei, F. M. (2011): *Analysis on the Bullwhip Effect Based on ABMS*. Procedia Engineering. Vol. 15.

- [Xu et al., 2010] Xu, X. Y., Sun, Y. H., Hua, Z. S. (2010): *Reducing the Probability of Bankruptcy Through Supply Chain Coordination*. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews. Vol. 40(2), pp. 201-215.
- [Yan y Katok, 2006] Yan, W. D.; Katok, E. (2006): *Learning, communication, and the bullwhip effect*. J. Oper. Manag. Vol. 24 (6), pp-. 839-850.
- [Yang y Burns, 2003] Yang, B.; Burn, N. (2003): *Implications of postponement for the supply chain*. Int. J. Prod. Res. Vol. 41(9), pp. 2075-2090.
- [Zarandi et al., 2008] Zarandi, M. H. Fazel; Pourakbar, M.; Turksen, I. B. (2008): *A fuzzy agent-based model for reduction of bullwhip effect in supply chain systems*. Expert systems with applications. Vol. 34(3), pp. 1680-1691.